

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **INTERPRETACIÓN SÍSMICA- ESTRUCTURAL 3D Y ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS EN LAS ARENAS C-4, C-5 Y C-6 DE LA FORMACIÓN MISOA DE EDAD EOCENO EN EL SUR DEL BLOQUE I Y NORTE DEL BLOQUE XII DE LA UNIDAD DE EXPLOTACIÓN LAGOMAR EN EL LAGO DE MARACAIBO**

Trabajo especial de grado presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela por el  
Br. Carlos Federico Martin Cordones  
Para optar al título de Ingeniero Geofísico

Caracas, Febrero de 2006

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **INTERPRETACIÓN SÍSMICA- ESTRUCTURAL 3D Y ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS EN LAS ARENAS C-4, C-5 Y C-6 DE LA FORMACIÓN MISOA DE EDAD EOCENO EN EL SUR DEL BLOQUE I Y NORTE DEL BLOQUE XII DE LA UNIDAD DE EXPLOTACIÓN LAGOMAR EN EL LAGO DE MARACAIBO**

Tutor académico: Prof. José Perdomo.

Tutores industriales: MSc. Sergio Pérez

Ing. Claudio Zerpa

Trabajo especial de grado presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela por el

Br. Carlos Federico Martin Cordones

Para optar al título de Ingeniero Geofísico

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a Mi padre Federico Martin, quien yo sé que le hubiese gustado estar a mi lado en este momento, a Mi madre Isabel Cordones por ser una magnifica persona que me ha apoyado en todo momento...

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme salud y vida para lograr esta grandiosa meta hoy en día.

A la Universidad Central de Venezuela y todos los profesores que trabajan en ella por formarme como el profesional y la persona quien soy hoy.

A mi tutor académico José Luis Perdomo por aceptarme como su tesista y tutoriarme de manera excelente.

A mi madre por apoyarme en todo momento, guiarme hasta cumplir con esta grandiosa meta y también por desempeñar muy bien el papel de Madre y Padre.

A mis hermanos: Federico, Mireya, Munia y Alejandro por su apoyo incondicional en cualquier momento

A Luzmir Boyer, por enseñarme que hay que luchar muy duro por todo lo que se quiere en esta vida.

A toda mi familia, en especial a mi tío Eloy Dorta y tía Ingrid Cordones, por ser como unos segundos padres para mí.

A las familias Boyer, González, Estrada y Martínez, por brindarme tan bonita amistad y apoyo durante la ejecución del trabajo.

A todos mis amigos en especial a Fabian, Jhannes, Liz, Mou...

A mis tutores industriales: Sergio Pérez y Claudio Zerpa por sus enseñanzas impartidas.

A todas las personas que trabajan en la unidad E.I Lagomar. En especial a Jean Jimenez, Jean Padilla, Gladys Dávila, el Sr. Roberto Gamarra, Helen González, Ana Carmona, Ronald Palencia, Javier Márquez. Que hicieron posible este trabajo

A Hender de Almeida por su amistad y soporte técnico en las aplicaciones

**Martin C. Carlos F.**

**INTERPRETACIÓN SÍSMICA- ESTRUCTURAL 3D Y ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS EN LAS ARENAS C-4, C-5 Y C-6 DE LA FORMACIÓN MISOA DE EDAD EOCENO EN EL SUR DEL BLOQUE I Y NORTE DEL BLOQUE XII DE LA UNIDAD DE EXPLOTACIÓN LAGOMAR EN EL LAGO DE MARACAIBO**

**Tutor académico: Prof. José Perdomo. Tutores industriales: MSc. Sergio Pérez e Ing. Claudio Zerpa. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2006., n° pag. 102**

**Palabras claves:** Atributos sísmicos, Modelo sedimentológico, registro sísmico dipolar, registro de densidad, Formación Misoa

**Resumen.** El Trabajo Especial de Grado que se presenta a continuación contiene los resultados obtenidos a partir de la interpretación sísmico-estructural y análisis atributos sísmicos de un área ubicada en el sur del Bloque I y norte del Bloque XII en el Lago de Maracaibo.

Los objetivos generales estuvieron enfocados en definir el marco estructural de las arenas C-4, C-5 y C-6 de la Formación. Misoa de la serie Eoceno, así como también reconocer posibles patrones sedimentológicos y de calidad de roca correlacionando atributos sísmicos con isopropiedades de las rocas.

El marco estructural definido respondió a los esfuerzos a los cuales estuvo sometida la cuenca desde principios del Eoceno hasta finales del Mioceno. Se evidenciaron los sistemas de fallas principales Lama-Icotea y Lama-Este y fallas normales de rumbo perpendicular a las fallas principales y buzamiento hacia el noreste. La estructura interpretada es un alto estructural en el bloque I con rumbo NNE y buzamiento de 7° aproximadamente hacia el SSE.

De igual forma la información de atributos estratigráficos, los mapas de similitud y los de facies sísmicas se correlacionaron con información de pozos en el sur del Bloque XII, con esto se logró reconocer un área prospectiva en la zona, en la cual se propuso una localización.

Finalmente, se recomendó obtener tiros de verificación vertical, registros sísmicos dipolares y registros de densidad en las futuras localizaciones para realizar mejores calibraciones sísmica/pozo. También se recomendó realizar un estudio sedimentológico en las arenas C-inferior para dar mayor soporte al estudio ejecutado.

# INDICE

	<b>Pág.</b>
Lista de tablas.....	ix
Lista de figuras.....	x
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
Antecedentes.....	4
Objetivos.....	5
Objetivos generales y específicos.....	5
Localización del área de estudio.....	6
Metodología de trabajo empleada.....	6
Software utilizados.....	7
<b>I.    MARCO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DEL</b>	
<b>    OCCIDENTE DE VENEZUELA.....</b>	<b>9</b>
Geología del Occidente de Venezuela.....	9
Geología de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	14
Geología estructural de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	16
Estratigrafía de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	18
<b>II.   VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>27</b>
Carga de los datos sísmicos y de los datos de pozos.....	27
Resolución sísmica vertical.....	28
Cálculo de la resolución sísmica vertical.....	29
Correlaciones estratigráficas.....	31
Sismogramas sintéticos.....	32

Elaboración de sismogramas sintéticos.....	33
<b>III. INTERPRETACIÓN SÍSMICO-ESTRUCTURAL.....</b>	<b>38</b>
Consideraciones	
teóricas.....	38
Interpretación de	
fallas.....	40
Interpretación de horizontes.....	43
Atributos sísmicos estructurales.....	52
Atributo sísmico de buzamiento ( <i>dip</i> ).....	52
Atributo sísmico de rumbo ( <i>azimuth</i> ).....	52
Atributo sísmico de la segunda derivada ( <i>edge</i> ).....	53
Extracción y análisis de atributos sísmicos	
estructurales.....	54
Análisis de la interpretación sísmico-estructural.....	58
<b>IV. ATRIBUTOS SÍSMICOS DE LA TRAZA COMPLEJA.....</b>	<b>62</b>
Consideraciones teóricas.....	62
Atributos sísmicos de la traza compleja.....	64
Amplitud instantánea.....	65
Frecuencia instantánea.....	66
Polaridad instantánea.....	67
Extracción y análisis de mapas de atributos sísmicos de la traza compleja...67	
<b>V. CONVERSIÓN TIEMPO PROFUNDIDAD.....</b>	<b>73</b>

Conversión de mapas estructurales en tiempo a profundidad.....	75
Conversión de planos de fallas en tiempo a profundidad.....	75
<b>VI. CORRELACIÓN DE ATRIBUTOS SÍSMICOS CON DATOS PETROFÍSICOS.....</b>	<b>81</b>
Consideraciones teóricas.....	81
Correlación de atributos/petrofísica.....	82
<b>VII. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FACIES SÍSMICAS.....</b>	<b>85</b>
Consideraciones teóricas.....	85
Generación y análisis de mapas de similitud.....	89
Generación y análisis de facies sísmicas.....	91
<b>VIII. ÁREAS PROSPECTIVAS.....</b>	<b>100</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>103</b>
Conclusiones.....	103
Recomendaciones.....	105
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>106</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla N°</b>	<b>Página</b>
1. Valores de la resolución sísmica vertical calculada en el pozo LLB0025.....	30
2. Valores d la resolución sísmica vertical calculada en el pozo VLA0833.....	31
3. Esquema de bordes de Sobel.....	55
4. Valores de ANT en el intervalo C-5+44ms para cada uno de los pozos que se usaron para realizar el estudio de similitud.....	82
5. Valores del coeficiente de correlación entre los atributos obtenidos y la ANT en el intervalo de interés.....	83
6. Matriz de correlación entre los atributos generados para el análisis de similitud y posterior identificación y clasificación de facies sísmicas.....	87

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura N°</b>	<b>Página</b>
1. Ubicación del área de estudio.....	6
2. Ubicación de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	15
3. Bloque diagramático en donde se muestra el desarrollo de la Falla Ático.....	17
4. Sección estructural del Bloque I y XII.....	18
5. Columna tipo del área de estudio.....	26
6. Ubicación de los pozos usados para el estudio en toda el área.....	28
7. Espectro de amplitud extraído en las adyacencias del pozo LLB0025, en una ventana de tiempo que abarca desde los 2200 ms hasta los 2550 ms.....	30
8. Espectro de amplitud extraído en las inmediaciones del pozo VLA0833, en una ventana de tiempo desde los 1700 ms hasta los 2000 ms.....	31
9. Gráfica de conversión tiempo-profundidad para el pozo LLB0025.....	34
10. Gráfica de conversión tiempo-profundidad para el pozo VLA0833.....	34
11. Sismograma sintético generado para el pozo LLB0025.....	35
12. Línea sísmica E-W mostrando el sismograma sintético generado en el pozo LLB0025, montado en la sísmica.....	35
13. Flujo de trabajo usado en <i>Syntool</i> para generar el sismograma sintético al pozo VLA0833.....	36
14. Línea sísmica E-W mostrando el sismograma sintético generado para el pozo VLA0833, montado en la sísmica.....	36
15. Diagrama estructural del Bloque I.....	40
16. Esquema estructural del área explicado por Bueno (1996) .....	41
17. Cubo sísmico de coherencia generado en el área de estudio.....	42
18. Línea sísmica en dirección E-W, en donde se muestran los principales sistemas de fallas que fueron interpretadas en el área de estudio.....	43
19. Mallado generado de la interpretación del horizonte correspondiente a la Discordancia del Eoceno.....	45

<b>Figura N°</b>	<b>Página</b>
20. Mapa estructural en tiempo de la Discordancia del Eoceno.....	46
21. Malla interpretada del reflector correspondiente a la arena C-4.....	47
22. Mapa estructural en tiempo correspondiente a la arena C-4.....	47
23. Malla interpretada del reflector correspondiente al tope de la arena C-5.....	49
24. Mapa estructural en tiempo correspondiente a la arena C-5.....	49
25. Malla interpretada del reflector correspondiente al tope de la arena C-6.....	50
26. Mapa estructural en tiempo correspondiente a la arena C-6.....	50
27. Malla interpretada del reflector correspondiente al tope de la Formación Guasare.....	51
28. Mapa estructural en tiempo correspondiente al tope de la Formación Guasare.....	51
29. Mapa de “ <i>dip-azimuth</i> ” extraído al tope de la Formación Guasare.....	55
30. Mapa de “ <i>edge</i> ”, extraído de la Formación Guasare en toda el área de estudio.....	55
31. Mapa de “ <i>dip-azimuth</i> ” extraído al tope de la arena C-6.....	56
32. Mapa de “ <i>edge</i> ”, extraído al tope de la arena C-6.....	56
33. Mapa de “ <i>dip-azimuth</i> ”, extraído al tope de la arena C-5.....	57
34. Mapa de “ <i>edge</i> ”, extraído al tope de la arena C-5.....	57
35. Línea sísmica E-W en la cual se integra la interpretación de las fallas Lama-Icotea y Lama-Este, con los respectivos horizontes interpretados... 58	58
36. Línea sísmica SW-NE tomada en el Bloque I, en donde se muestran los topes estudiados y el sistema de fallas normales con buzamiento noreste.....	59
37. Línea sísmica con orientación SW-NE tomada en el Bloque XII, en donde se puede observar la configuración estructural de la zona.....	59
38. Sección sísmica horizontal en tiempo (2312 ms).....	60
39. Sección sísmica horizontal en tiempo a 2530 ms del cubo sísmico HFI.....	61
40. Traza sísmica analítica.....	64

<b>Figura N°</b>	<b>Página</b>
41. Línea sísmica E-W, en donde se aprecia el atributo sísmico amplitud instantánea.....	68
42. Misma línea sísmica E-W anterior pero con la interpretación estructural cargada.....	69
43. Mapa de frecuencia instantánea promedio extraído al tope de la arena C-5 más 44 milisegundos por debajo.....	69
44. Mapa del atributo energía total en el intervalo C-5+44ms en el área del LLB0066.....	70
45. Mapa del atributo Amplitud RMS en el intervalo C-5+44ms en el área del LLB0066.....	71
46. Mapa del atributo de fase instantánea en el intervalo C-5+44ms, en el área del LLB0066.....	71
<b>47.</b> Mapa del atributo de amplitud total en el intervalo de C-5+44ms, en el área del LLB0066.....	72
<b>48.</b> Modelo de velocidad generado a partir del uso de la Discordancia del Eoceno, el tope de la Formación Guasare y los pozos del área.....	74
49. Mapa estructural en profundidad de la Discordancia del Eoceno.....	75
50. Mapa estructural en profundidad del horizonte C-4.....	76
51. Mapa estructural en profundidad del horizonte C-5.....	77
52. Mapa estructural en profundidad del horizonte C-6.....	78
53. Mapa estructural en profundidad del tope de la Formación Guasare.....	79
54. Vista superior del modelo 3D de las fallas interpretadas en el área de estudio.....	80
55. Área del LLB0066 en donde se enfocó el estudio de correlación sísmica/pozo.....	82
56. Mapa de ANT con un coeficiente de correlación de 70,95%.....	83
57. Mapa de ANT con un 70,95% de coeficiente de correlación con el atributo sísmico de energía total y amarrado con los pozos.....	84
58. Esquema de trabajo de las redes neuronales.....	86

<b>Figura N°</b>	<b>Página</b>
59. Esquema de los pasos necesarios para generar los mapas de similitud.....	88
60. Mapa de similitud generado en las adyacencias del pozo LLB0059.....	90
61. Mapa de similitud generado en las adyacencias del pozo LLB0064.....	91
62. Mapa de clasificación de facies sísmicas en todo el intervalo de la arena C-5.....	92
63. Modelo de la traza sísmica más representativa para cada una de las 7 clases generadas sobre la arena C-5.....	93
64. Línea sísmica arbitraria que pasa por los pozos LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001.....	93
65. Línea sísmica arbitraria que atraviesa a los pozos LLB0025, LLB0015, LLB0061, LLB0062 y LLB0066.....	94
66. Mapa de clasificación de facies sísmicas generado en el intervalo C-5+44ms.....	95
67. Modelo de la traza sísmica más representativa para cada una de las 9 clases generado en el intervalo C-5+44ms.....	95
68. Línea arbitraria que incluye los pozos LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001.....	96
69. Línea sísmica arbitraria con los pozos LLB0025, LLB0061, LLB0062 y LLB0066 sobre el intervalo de C-5+44ms.....	97
70. Línea sísmica arbitraria con los pozos LLB0025, LLB0015, LLB0061 y LLB0062 y LLB0066.....	98
71. Línea arbitraria que incluye los pozos LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001.....	99
72. Visualización 3D del marco estructural con el mapa de facies sísmicas, generado en la zona.....	101
73. Visualización 3D del modelo estructural a nivel del intervalo C-5+44ms con el mapa de frecuencia instantánea.....	102

## INTRODUCCIÓN

La identificación de las principales estructuras geológicas existentes en el subsuelo, permite iniciar el proceso de determinar la ubicación de las mejores zonas para la localización de nuevos pozos de desarrollo, de avanzada y exploratorios. Esta tarea se halla entre los cimientos principales de la cadena de procesos cuyo objetivo es lograr la eficiencia de la explotación de un campo. Esta identificación conlleva a un mejor entendimiento y conocimiento de la configuración de los yacimientos ofreciendo así mayor precisión a la hora de tomar decisiones de perforación.

En los últimos años se ha incrementado la dificultad en la localización de nuevos yacimientos de hidrocarburos en el ámbito mundial por la explotación exhaustiva a la que se ha expuesto este vital recurso natural no renovable. El crecimiento continuo de la población mundial en los grandes centros urbanos aunado con otros factores socio-económicos conllevan a un incremento continuo en la demanda de consumo de hidrocarburos, esto trae como consecuencia directa que se aumente la producción de hidrocarburos y sus derivados, y por ende hayan sido explorados los yacimientos de más fácil accesibilidad, quedando por descubrir o analizar los de mayor complejidad, tanto geológica como geográfica.

De aquí, que la tarea para los próximos exploradores, en este caso los geofísicos, de la industria petrolera, será la de perfeccionar y desarrollar nuevas técnicas en las áreas de adquisición, procesamiento e interpretación sísmica, a fin de aumentar el avance en la búsqueda de nuevos yacimientos o retomar el reto de recobrar más reservas de aquellos ya conocidos que inclusive puedan haber sido descartados en un principio por su baja rentabilidad o por su difícil accesibilidad, y con esto contribuir a satisfacer la demanda de este importante recurso energético.

Como se dijo anteriormente, para los próximos años se espera que los yacimientos a explotar se encuentren en zonas geográficamente inaccesibles o en

zonas geológicamente complejas los cuales necesitarán de herramientas de interpretación sísmica estructural de mayor resolución para poder localizar posibles yacimientos en dichas zonas; es por ello, que un primer paso se ha dado desde principios de los años 80, con la tecnología de imagen sísmica 3D, que ha contribuido significativamente a la interpretación de superficies geológicas de interés y a la exploración y consecuente explotación de importantes yacimientos de hidrocarburos en la industria petrolera.

De aquí resulta el hecho que en las últimas décadas se ha utilizado la información sísmica para conocer la geología del subsuelo. Esta información ha sido aplicada exitosamente en la descripción de las estructuras geológicas. Desde finales de los años 70 e inicios de los años 80 las fuentes sísmicas 3D tuvieron una mayor fuerza en el desarrollo de los sistemas de interpretación interactiva (Dorn et al., 1994)

Lo vital de la interpretación sísmica 3D radica en que los geólogos de exploración y de desarrollo pueden visualizar y entender mucho mejor, tanto el contexto estructural como el estratigráfico de los yacimientos en los cuales se están trabajando por aportar densidad espacial, imágenes de alta resolución y capacidad de discriminar variables petrofísicas. Todo esto es posible con el uso de secciones sísmicas verticales complementadas con secciones horizontales en tiempo “time slices” que permiten definir marcos estructurales; reconocer fallas, continuidad de reflectores y visualizar estilos depositacionales, de manera mucho más precisa que con la sísmica 2D (Dorn et al., 1994)

Lo anteriormente expuesto conlleva a una revisión de toda la información que se tiene en materia de hidrocarburos, pero en este caso específico, en el ámbito geológico y geofísico, en las cuencas petrolíferas. En Venezuela, la Cuenca del Lago de Maracaibo es una de las grandes zonas de producción de hidrocarburos del país. En ella se encuentra la estructura geológica del campo Lagomar en el centro norte del Lago de Maracaibo, que presenta un gran reto para los métodos sísmicos por la

perturbación en la señal sísmica por efecto de la capa de lodo en el lecho del lago, la frecuente presencia de altos buzamientos y pobre resolución sísmica de las capas del subsuelo y por un complejo sistema de fallas generalmente de alto buzamiento, que requieren imágenes de mayor resolución que las que normalmente proporcionan las de la sísmica convencional. Varias acumulaciones de los hidrocarburos ahí presentes están atrapadas estratigráficamente a lo largo de una gran discordancia angular y el entrapamiento está complementado por fallas y cierres estructurales fallados. La falta de resolución de la sísmica convencional introduce incertidumbre en el modelo estructural actual (Planchart et al, 2002)

Entre las estructuras de mayor importancia, que se encuentran en la zona se tiene el sistema de Fallas Lama-Icotea y el sistema de Fallas de Lama-Este al oeste y al este de la zona en estudio, respectivamente. Dicha área representa un alto estructural con una serie de pequeñas fallas asociadas, como se ha explicado anteriormente, la cual en la zona sur se encuentra muy poco desarrollada, pero sin embargo, se estima que tiene un gran potencial por la producción de los pozos cercanos.

En vista de lo anterior, el estudio a desarrollar pretende realizar la integración de la interpretación sísmica con la correlación ajustada de marcadores geológicos previamente definidos, para establecer un marco estructural y estratigráfico confiable, que fusione los datos disponibles con la tecnología en estudios de caracterización de yacimientos. En este sentido, se interpretarán las superficies correspondientes a las unidades cronoestratigráficas de las arenas C-4, C-5 y C-6 de la Formación Misoa, definidas por Bueno (1996), en el área marginal sur del Bloque I y norte del Bloque XII de la segregación LAGOMAR de la Gerencia de Estudios Integrados de Yacimientos de PDVSA. Así mismo, se hará un análisis de atributos sísmicos los cuales se correlacionarán con datos petrofísicos para el reconocimiento de posibles patrones de calidad de roca y de unidades sedimentarias de los horizontes

interpretados, aunado a esto se realizará una identificación y clasificación de facies sísmicas basados en atributos sísmicos.

### *Antecedentes*

Para la reactivación de áreas que se consideraban marginales por su escasa producción y carencia de alta densidad de pozos exitosos es necesaria la realización de un estudio minucioso que contemple una revisión de la sísmica, la geología, petrofísica y datos de producción de dichas áreas. Es por ello, que este trabajo está enfocado en los yacimientos de la serie Eoceno, de manera más exacta, las arenas C-4, C-5 y C-6 de la zona marginal del Bloque I y norte del Bloque XII perteneciente a la Unidad de Explotación Lagomar.

Hacia el sur del Bloque I, en el área de interés, entre los yacimientos más importantes se encuentran C-5 VLA0011, C-5 VLA0012 FLANCO ESTE, C-6I VLA0011, C-6S/M VLA0011 y C-6S/M VLA0011 PILAR. De estos yacimientos los pozos activos que presentan la mayor producción actualmente son VLA0120, VLA0264, VLA0565 los cuales producen de la arena C-5, con una tasa real de petróleo de 600 bls/d, aproximadamente.

Por otra parte en el norte del Bloque XII, se tiene entre los yacimientos más relevante C-5 LLB0039, C-6S/M LLB0015. De estos yacimientos los pozos con mayor producción son LLB0061, LLB0063 y LLB0066 con una tasa real de petróleo 970 bls/d aproximadamente, produciendo de la arena C-6, y los pozos LLB0041, LLB0042 y LLB0043 con una tasa real de petróleo de 690 bls/d.

***Objetivos generales.***

- ✓ Definir el marco estructural de las arenas C-4, C-5 y C-6 de la Formación Misoa de Edad Eoceno, en un área de 127 km<sup>2</sup> comprendida entre el sur marginal del Bloque I y norte del Bloque XII de la U.E Lagomar del Lago de Maracaibo.
- ✓ Reconocer posibles patrones sedimentológicos y de calidad de roca correlacionando atributos sísmicos con isopropiedades de las rocas.

***Objetivos específicos.***

- ✓ Realizar la calibración sísmica/ pozo usando la Discordancia del Eoceno y el tope de la Formación Guasare.
- ✓ Interpretar los horizontes correspondientes a la Discordancia del Eoceno, arenas C-4, C-5 y C-6 de la Formación Misoa y el tope de la Formación Guasare.
- ✓ Generar atributos sísmicos estructurales (Cubo de Coherencia) para identificar las tendencias de las principales fallas existentes en la zona.
- ✓ Interpretar las fallas existentes en el área de interés.
- ✓ Extraer los atributos sísmicos ajustados a ventanas de tiempo según la superficie de los horizontes.
- ✓ Elaborar mapas estructurales en tiempo.
- ✓ Generar modelos de velocidades para los horizontes interpretados.
- ✓ Realizar conversión de los mapas en tiempo a profundidad
- ✓ Elaborar mapas estructurales en profundidad.
- ✓ Integrar y correlacionar la interpretación sísmica/ geológica y mapas de atributos sísmicos con datos petrofísicos y/o de yacimiento, para predecir la distribución areal de las propiedades de rocas.
- ✓ Identificar posibles áreas prospectivas.

### ***Localización del área de estudio.***

El área en estudio se encuentra localizada geográficamente dentro de las siguientes coordenadas UTM, todas éstas referidas al Huso 19 La Canoa:

- ✓ Coordenada Este mínima: 215511 m
- ✓ Coordenada Este máxima: 227004 m
- ✓ Coordenada Norte mínima: 1105279 m
- ✓ Coordenada Norte máxima: 1117984 m

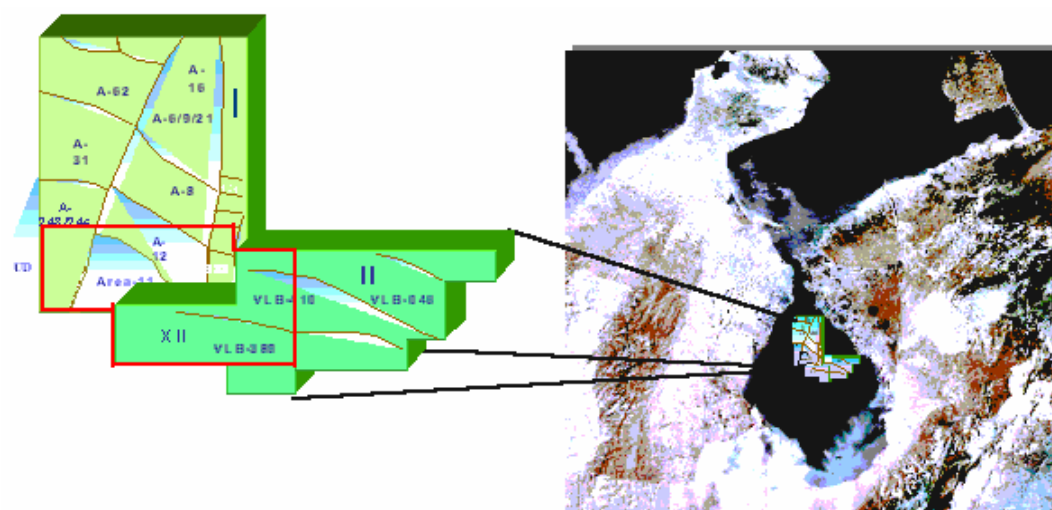


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Tomado de Planchart et al (2002)

Dicha área abarca una extensión de 127 km<sup>2</sup> aproximadamente

### ***Metodología de trabajo empleada.***

A continuación se presenta la metodología o esquema utilizado para la realización de la interpretación 3D del área de interés:

1. Recopilación y validación de la información

- 1.1. Carga y revisión de datos sísmicos y de pozos
2. Calibración sísmica y geológica
  - 2.1. Validación de curvas de registros sísmicos y de densidad.
  - 2.2. Generación de sismogramas sintéticos
  - 2.3. Amarre sísmica-pozo con el uso de los marcadores geológicos
3. Definición del marco estructural
  - 3.1. Interpretación de fallas
  - 3.2. Interpretación de horizontes
  - 3.3. Generación de mapas estructurales en tiempo
  - 3.4. Generación de atributos estructurales de superficie
  - 3.4. Correlación de las fallas.
4. Conversión a profundidad de mapas en tiempo.
  - 4.1. Generación del modelo de velocidades
  - 4.2. Conversión de mapas estructurales en tiempo a profundidad
5. Análisis de atributos sísmicos
  - 5.1. Extracción de atributos sísmicos estratigráficos.
  - 5.2. Elaboración de mapas de atributos sísmicos
  - 5.3. Correlación de los atributos sísmicos estratigráficos con datos petrofísicos y de producción.

***Software utilizados.***

A continuación se presenta los programas y aplicaciones usados durante el desarrollo del trabajo:

La selección de la lista de pozos y la carga de cada una de las curvas requeridas se hicieron en *OpenWorks*® usando las aplicaciones *Well Data Manager*® y *Well List Manager*®. Para las correlaciones estructurales de los pozos se usó *StratWorks*®, en la elaboración de los sismogramas sintéticos se usó *Syntool*®. La interpretación de horizontes como tal se realizó en *SeisWorks*® y con la ayuda de las

aplicaciones *OpenVision*® y *EarthCube*® se pudieron realizar las imágenes 3D. En la extracción de los atributos sísmicos se usó *PostStack Pal*®. La conversión de tiempo a profundidad se llevó a cabo con *TDQ*® y *Depth Team*®. Todas estas aplicaciones pertenecen al ambiente integrado *Landmark*™

Los mapas de similitud fueron generados en una aplicación UNIX desarrollada por PDVSA-Intevep. Dichos mapas fueron generados con aquellos atributos que eran independientes, esto fue calculado en *Seisclass*®, de la plataforma *Geoframe*®. Para llevar a cabo la correlación de la información de los atributos sísmicos con los datos petrofísicos se usó la plataforma *Geoframe*® del ambiente integrado *Schlumberger*™, la aplicación que realiza este proceso es *LPM*®. Y por último, para el reconocimiento de los patrones sedimentológicos, se trabajó en el ambiente integrado *Epos3*® de *Paradigm*™. En dicho ambiente se usaron las aplicaciones siguientes: generación de mapas de facies sísmicas en *Stratimagic*® y visualización de los volúmenes de facies sísmicas en *Voxelgeo*® y *3DCanvas*®.

## **CAPITULO I.**

### **MARCO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DEL OCCIDENTE DE VENEZUELA**

En este capítulo se explicará de manera resumida la evolución geológica del occidente de Venezuela desde el Paleozoico hasta el Pleistoceno, para luego comentar un poco sobre la geología local y finalmente hablar de la geología estructural de la Cuenca del Lago de Maracaibo.

#### *Geología del Occidente de Venezuela*

Hacia el Paleozoico, sobre el basamento ígneo metamórfico hubo una sedimentación marina aislada en los Andes y Perijá. Esto se corrobora con los afloramientos de rocas ígneas y rocas sedimentarias, de edad Ordovícico- Silúrico, de ambientes de plataformas y marino profundo. Así mismo, en el subsuelo del Lago de Maracaibo está representado por rocas metasedimentarias Ordovícicas. (Parnaud et al. 1995).

En el flanco meridional de los Andes de Mérida el Paleozoico Inferior está constituido por las formaciones Caparo (Chirst, 1927) y el Horno (Bellizia, 1968) de edades Ordovícico y Silúrico respectivamente. El Paleozoico Superior en los Andes de Mérida está conformado por las formaciones Mucuchachí, Sabaneta y Palmarito. En la Sierra de Perijá, el Paleozoico Superior está representado por dos intervalos: el inferior; que incluye a la Formación Caño del Noreste, Formación Caño Indio y Formación Río Palmar, las cuales se consideran equivalentes a la Formación Sabaneta en los Andes de Mérida y el Paleozoico Superior, más joven, que contiene a la Formación Palmarito. (Schlumberger, 1980)

En la Cuenca del Lago de Maracaibo, las perforaciones se han encontrado con rocas metamórficas por debajo del Cretácico. González de Juana et al (1980) consideraron estos niveles estratigráficos equivalentes a las formaciones Paleozoicas

de la región central de los Andes. Sin embargo, los datos sísmicos no señalan similitud alguna entre la estratigrafía paleozoica de las cuencas del Lago de Maracaibo y la de Barinas- Apure. Según Parnaud et al (1995) esto podría ser el reflejo del diferente grado de metamorfismo.

Ya para el Mesozoico, durante el Triásico hubo erosión y la sedimentación ocurrió durante el Jurásico en cuencas alargadas de distensión, en la Cuenca de Maracaibo, Perijá y en los Andes, donde consiste en capas rojas de ambiente lacustre asociadas con volcánicas. En la Guajira, norte del Golfo de Venezuela y hasta Paraguaná la sedimentación es marina y posiblemente continuo con el geosinclinal del norte de Venezuela, que luego dió origen a la Cordillera de la Costa. (Schlumberger, 1980)

En el Cretácico la sedimentación se presenta en la Cuenca de Maracaibo en una zona tectónicamente estable conocida como la “Plataforma de Maracaibo”, rodeada de unas áreas de mayor subsidencia: Surco de la Guajira al norte, Surco de Uribante en los Andes al sur, Surco de Machiques al oeste y al este el Surco de Barquisimeto. El mar invade desde el norte hacia el Cratón de Guayana al sur, y desde el oeste hacia la Plataforma de Maracaibo. Los clásticos basales son fluviales y alcanzan grandes espesores en los surcos y al progresar la transgresión se sedimentan carbonatos de aguas someras de gran persistencia lateral y vertical, con influencia de clásticos hacia el sur. Un evento importante que ocurrió durante el Cretácico, específicamente del Cenomaniense al Campaniense, fue la depositación de la Formación de La Luna. Esto ocurrió en un ambiente pelágico con un alto contenido de materia orgánica al avanzar los mares e inundar la Cuenca del Lago de Maracaibo, dichas rocas han sido consideradas por estudios geoquímicos como las principales generadoras de petróleo de hidrocarburos en dicha cuenca.

Para el cierre del Cretácico hay relleno gradual de la Cuenca de Maracaibo, se depositan unas lutitas de ambiente marino y se manifiesta una gran actividad

tectónica en el cinturón móvil del norte, donde la secuencia sedimentaria se metamorfiza.

Por otra parte, Ghosh et al (1996) han propuesto que la sucesión del Mesozoico- Cenozoico es el resultado de una fase de *Rift* Jurásico atribuida a la fragmentación de Pangea y a la colisión entre las placas de Sudamérica y Norteamérica. Tomando esto en cuenta, han definido tres megasecuencias para el Mesozoico:

1. *Rifting* Jurásico asociado por un lado a la apertura del Océano Atlántico, y por el otro lado ligado a la tectónica extensional operante en un escenario de retroarco detrás de la cordillera central de Colombia.
2. Cuenca de retroarco (“back arc basin”) de margen pasivo en el Cretácico Temprano con un relleno de clásticos continentales limitados por las depresiones preexistentes.
3. Cuenca antepais (“foreland basin”) en el Cretácico Tardío lo cual originó una transgresión intermitente y la depositación de secuencias retrogradacionales.

Al cierre del Cretácico en toda Venezuela hubo un retroceso del mar que se acentuó mas en el Paleoceno; la sedimentación se hace cada vez mas somera en la Cuenca de Maracaibo y se diferencian los siguientes ambientes: deltáico a nerítico suroeste de la cuenca, una plataforma marina somera al centro y un geosinclinal al este (Surco de Barquisimeto) (Schlumberger, 1980)

También para el final del Cretácico, más precisamente en el Maestrichtiense, inicios del Paleoceno, la anfosa de Perijá fue rellenada con los sedimentos de nivel alto de la Formación Mito Juan, cuya fuente de aporte se encontraba hacia el oeste (Ghosh et al, 1996). En la Cuenca de Maracaibo la Formación Guasare consiste de sedimentos marinos- someros y la base del sistema depositacional de plataforma, está

caracterizada sísmicamente por una superficie erosional. El subsiguiente sistema deltáico presenta reflectores discontinuos y de fuerte amplitud su base está marcada por solapamientos y biselamientos basales y su tope presenta truncaciones locales. Esta secuencia deltáica aumenta su espesor hacia el oeste, donde localmente forma abanicos de frentes deltáicos. Estas rocas paleocenas alcanzan unos 600 m de espesor. (Parnaud et al., 1995)

Hacia el final del Paleoceno y comienzos del Eoceno Inferior, el emplazamiento de las Napas de Lara comenzó al norte de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Estas avanzaron paulatinamente hacia el este, dando como resultado la formación de nuevas cuencas antepaís. Una de ellas con dirección N20°W, paralela al margen nororiental del Lago de Maracaibo; y la otra con una dirección aproximada E-W frente a las Napas. En la porción de la Cuenca del Lago de Maracaibo, durante el comienzo de la caída del nivel de base, la subsecuente erosión fue seguida por una depositación de sedimentos continentales. Las condiciones marino profundo hacia el norte de la cuenca permitieron la sedimentación de las turbiditas de nivel bajo de la Formación Trujillo (Hernández, 2001). La transgresión relacionada con la flexura de la plataforma frente a la carga ejercida por las Napas, alcanza la parte central de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Hacia el sur, persistió la acumulación continental como es el caso de la Formación Mirador. Otra transgresión en el Eoceno Temprano depositó los paquetes de arenas “C” de la Formación Misoa, las cuales son uno de los yacimientos de la cuenca.

Durante el Eoceno Medio, dos eventos mayores cambiaron la configuración de la cuenca. En primer lugar, el avance de las Napas de Lara hacia el sur, provocó la subsidencia flexural e inundación de la plataforma de la Cuenca Barinas- Apure. Segundo, la compresión tectónica ejercida por las Napas de Lara produjo una línea de bisagra a lo largo de la Plataforma de Maracaibo, en el sector nororiental. Allí, la depositación de los sedimentos de plataforma somera de Misoa “B” superior fue seguida por condiciones de agua más profundas.

Al final del Eoceno, el área cambia por completo. El relieve positivo al este y noreste separó la cuenca continental del Lago de Maracaibo de la cuenca marina ubicada en Falcón. Las zonas levantadas al oeste y sur de la sierra de Perijá y el oriente de la Cordillera de Colombia suministraron los sedimentos a un sistema depositacional fluvio-deltáico. Hacia el este continuó la circulación marina afectando la Cuenca Barinas- Apure. Esta influencia marina se extendió hasta la Cuenca del Lago de Maracaibo al final del Oligoceno Tardío- Mioceno Temprano.

En la cuenca el Oligoceno está representado por la Formación Icotea, la cual se encuentra rellenando depresiones de la superficie Eocena erosionada (González de Juana et al, 1980). Al comienzo del Mioceno la cuenca se caracterizó por una transgresión marina dentro de los límites del Lago de Maracaibo. En ella se depositó la Formación La Rosa, cuya base está representada por un intervalo arenoso conocido como el Miembro Santa Barbara, que actualmente tiene un especial interés petrolífero. En el Estado Trujillo, la Formación La Rosa puede ser equivalente, al menos parcialmente, a la Formación Palmar. La transgresión sólo tuvo lugar durante la mitad del período de depositación de la Formación La Rosa, y pasado este período, muestra características regresivas hasta interdigitarse en varios lugares con sedimentos del Miembro Lagunillas inferior de la Formación Lagunillas, la cual constituye otra de las grandes formaciones petrolíferas actuales de la cuenca. La sedimentación más joven de la Formación Lagunillas, que tiene por Miembro Bachaquero, representa el comienzo de la sedimentación continental en la Cuenca de Maracaibo.

Durante el Mioceno Tardío en la Cuenca del Lago de Maracaibo se depositó la Formación La Puerta, con intercalaciones de menor espesor; también en algunas zonas se depositó la Formación Isnotú. En la región del flanco norandino de Trujillo, en posición discordante sobre la Formación Paují, se encuentra la Formación Palmar, y sobre ésta las formaciones Isnotú y Betijoque alcanzan su mejor desarrollo. Las dos

últimas formaciones nombradas se extienden discordantemente sobre la Formación Paují en el área de la Serranía de Trujillo.

En el Plioceno, las cuencas de Maracaibo y Falcón, se van rellenando con sedimentos de mayor influencia continental lo cual constituye la Formación Onia. También es de hacer notar que el depocentro de sedimentación en la Cuenca de Maracaibo migró a través del Terciario. Mientras que el depocentro del Eoceno estaba en Zulia oriental, durante el Oligoceno se encontraba en la posición del actual río Catatumbo y durante el Mio-Plioceno en el flanco norandino (Salazar et al., 2000)

Ya para finalizar, durante el Pleistoceno, el Lago de Maracaibo estuvo sometido a oscilaciones en su nivel de agua, como consecuencia de las glaciaciones que influenciaron las condiciones climáticas; hay una retirada de los mares y la sedimentación en su mayoría continental, queda expuesta a la meteorización, representada por los depósitos de la Formación El Milagro. (Briceño, 1999)

### ***Geología de la Cuenca del Lago de Maracaibo***

La Cuenca de Maracaibo ocupa un área de aproximadamente 60.000 km<sup>2</sup> y forma parte del bloque tectónico de Maracaibo, ubicada al noreste de Venezuela. Esta limitada estructuralmente al norte por la Falla de Oca, al sureste por la Cordillera de los Andes, al oeste con la Sierra de Perijá y al este por la Serranía de Trujillo. (Briceño, 1999) Y geográficamente está totalmente incluida en la cuenca hidrográfica del Lago de Maracaibo. (González de Juana, 1980)

Genéticamente esta cuenca pertenece al sistema de cuencas pericratónicas, que tuvo sedimentación discontinua hasta quedar aislada de la Cuenca Barinas- Apure al sureste y de la Cuenca de Magdalena al suroeste, debido al levantamiento de los Andes y la Sierra de Perijá en el Terciario. (Briceño, 1999)



Figura 2. Ubicación de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Tomada de Padilla 2004

La Cuenca de Maracaibo es notable por su actual relieve estructural, por su complejidad geológica y por su magnífico hábitat de hidrocarburos. En esta cuenca se han descubierto grandes campos, como el de Ceuta, Lama- Lamar, el Costanero de Bolívar, La Paz- Mara, entre otros. En la Cuenca de Maracaibo están presentes todos los tipos de hidrocarburos desde extra pesado hasta liviano, incluyendo gas. (Briceño, 1999)

La evolución de dicha cuenca ha sido bastante compleja a lo largo del tiempo geológico debido a una serie de invasiones y regresiones marinas que fueron determinantes para la sedimentación, tanto de rocas madres generadoras de hidrocarburos como de rocas cajas, y como resultado de varios períodos de orogénesis y epirogénesis que produjeron las trampas adecuadas para retenerlos.

Debido a que ya se explicó la evolución geológica de la Cuenca del Lago de Maracaibo, solo se presentará un resumen de los principales eventos ocurridos con sus correspondientes formaciones asociadas extraído de González de Juana et al. (1980)

Hacia el Pérmico ocurre la Orogénesis Herciana o Evento Tecto-Termal, la cual causa metamorfismo e intrusiones ígneas, se forma el Arco de Mérida, levantamiento de la región central del Lago de Maracaibo. Durante todo el Cretácico ocurren una serie de transgresiones y hay sedimentación marina lo que contribuye a la

deposición de formaciones como La Luna, Capacho. Para finales del Cretácico se produce una Orogénesis la cual tiene poca intensidad en la Lago de Maracaibo. En el Paleoceno Superior, Eoceno Inferior y Medio persiste un ligero levantamiento epirogénico y probable crecimiento de fallas preexistentes, con formación de altos emergentes al comienzo de la sedimentación eocena. Se depositan las formaciones Mirador y Misoa. Estando en la Formación Misoa las grandes arenas productoras del centro del Lago. Hacia finales del Eoceno ocurre un levantamiento generalizado de la Cuenca del Lago de Maracaibo, también se destaca este período por haber fallamiento importante, particularmente en los alineamientos longitudinales del lago, con ejes de plegamiento orientados de sur a norte. Luego de esto se produce una erosión profunda de las formaciones del Eoceno Medio que produce remoción casi total de Puají-Mene Grande y remoción parcial de Misoa en alineamientos occidentales del Lago, fracturamiento de la sección de calizas cretácicas y migración del petróleo ya formado hacia los bloques levantados y fallados. Durante el Oligoceno y Mioceno Inferior continúa el período erosivo en la parte norte-noreste del Lago y comienza la sedimentación no marina hacia el oeste-suroeste.

Ya para el Mioceno se inicia la transgresión marina de la Formación La Rosa, que penetró profundamente hacia el sur depositando sus arenas basales en la parte central de la cuenca sobre la superficie erosionada del Eoceno Medio. Sobre La Rosa se depositó la Formación Lagunillas, menos marina, que llegó a excavar fondos de canales fluviales en lutitas de La Rosa. Al final del Mioceno se produjo el levantamiento definitivo de la Cordillera de los Andes en forma predominantemente vertical.

### ***Geología estructural de la Cuenca del Lago de Maracaibo***

La Cuenca de Maracaibo presenta dos sistemas de fallas principales en la dirección NNE, estas son Icotea y Pueblo Viejo, las cuales han tenido una historia compleja, generando decenas de interpretaciones desde los inicios de la exploración

petrolera. Desde el Jurásico hasta el Eoceno Inferior, el desplazamiento de la Falla de Icoatea es normal y esta asociado al régimen de apertura continental iniciado en el Jurásico, para luego reactivarse durante toda la etapa de subsidencia termal que comenzó en el Cretácico (Lugo, 1992)

Según Bueno (1996), la zona de estudio está constituida por un alto estructural a nivel del Eoceno de rumbo NNE y buzamiento generalmente SSE. Estructuralmente pueden definirse tres sistemas de fallas en el área de interés. Por una parte tenemos al sistema de rumbo NNE-SSO, el cual consiste en fallas regionales que delimitan al alto estructural en sus flancos occidental y oriental. En su parte occidental se trata de la Falla de Icoatea, cuyo buzamiento es normal hacia el oeste y en la parte oriental se trata de la Falla “Este de Lama”, de buzamiento normal hacia el Este. La Falla del Icoatea está acompañada en su flanco este por la Falla del Atico, la cual es una falla sintética convertida en retrocorrimiento por la inversión estructural durante el Eoceno (figura 3)

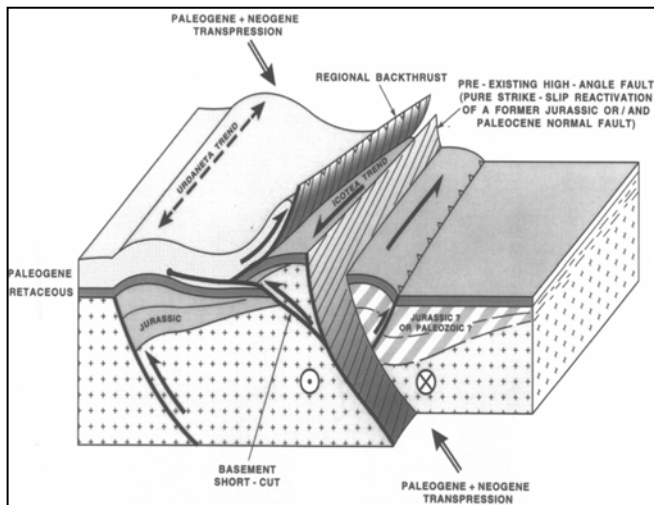


Figura 3. Bloque diagramático en Donde se muestra el desarrollo de la Falla del Atico durante el Proceso de transpresión al cual fue sometida la FallaLama-Icoatea. Tomado de Roure et al. (1997)

De igual forma, el mismo autor habla de un segundo sistema de fallas normales de rumbo ONO-ESE que localmente varía a NNO-SSE, cortando al alto en escalones. Dichas fallas tiene generalmente buzamiento norte, pudiendo localmente estar acompañadas por fallas de buzamiento sur, con las cuales forman grabens. Los

sistemas anteriores están cortados por un tercer sistema, el cual solo puede ser detectado por una interpretación muy densa, dicho sistema consiste en cizallamientos conjugados, de edad probablemente Mioceno, donde provocan el zigzaguo del rumbo de las fallas de los otros sistemas.

Existen diversos anticlinales de dirección preferencial NNE paralelos y cercanos a las fallas próximas a las crestas de los mismos, constituyendo un rasgo generalizado en toda la cuenca. Estas fallas son sistemas mayores que han sido reactivados e invertidas durante los diferentes regímenes tectónicos que afectaron la cuenca y su relleno sedimentario; son elementos estructurales que no mueren, sino que por el contrario acomodan la orientación del desplazamiento de los bloques adyacentes acorde con los sistemas de esfuerzos que se estén imponiendo a través del tiempo. (Briceño, 1999) En el sistema de Fallas de Icoatea se encuentra un sistema de fallas longitudinales subparalelas a la falla principal y un sistema de fallas transversales presentes en toda la parte central del Lago.

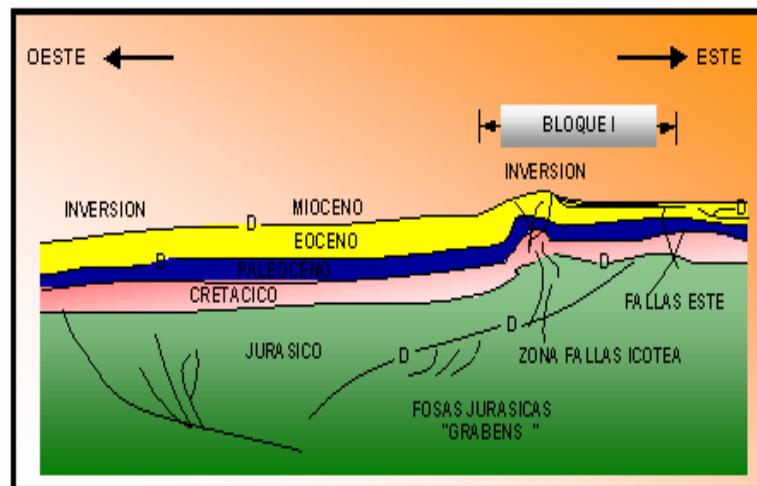


Figura 4. Sección estructural del Bloque I y XII. Tomado de Link et al. 1994

### *Estratigrafía de la Cuenca del Lago de Maracaibo*

La superficie sobre la cual los sedimentos del Bloque I y XII comenzaron a acumularse era irregular, siendo la inversión del gran sistema de fallas de Icotea, la causante de las principales irregularidades. Estas reactivaciones se originaron a consecuencia de la interacción entre las placas tectónicas de Sur América y del Caribe. Al tiempo de la primera sedimentación, estas fallas estaban aún activadas creando más irregularidades en la sedimentación, además de aquellas creadas por la paleotopografía y la naturaleza fluvial de los sedimentos. Recientes análisis realizados en las áreas ubicadas al norte, indican que el arribo de los sedimentos fue principalmente desde la dirección del levantamiento de la Sierra de Perijá al oeste y noroeste. Dichos sedimentos fueron depositados en áreas de relieves bajos, posiblemente en un plano costero, pero con muy poca influencia marina.

Sobre los sedimentos fluviales hubo un influjo del mar desde el borde norte de la cuenca, depositándose principalmente las lutitas de la Formación La Rosa. Las arenas basales de la Formación La Rosa están constituidas por aproximadamente 30 pies de arena de grano fino a medio, con porosidad promedio de 24.0% y permeabilidad superior a los 50 milidarcys, por lo que se considera un excelente yacimiento (Padilla 2004). Las mismas en su mayoría yacen sobre la discordancia del Eoceno; sin embargo, y hacia el Oeste posiblemente descansa sobre la Formación Icotea de Edad Oligoceno. Sobre la Formación La Rosa se depositó concordantemente las formaciones Lagunillas, La Puerta, Onia, hasta llegar a la Formación El Milagro, la cual está constituida por los sedimentos más recientes.

La columna estratigráfica del área comienza en la base con la Formación La Quinta perteneciente al Jurásico:

#### **Formación La Quinta.**

Esta formación refleja una sedimentación continental con aporte local de material volcánico (cenizas volcánicas), la Formación La Quinta en su parte basal está compuesta por capas tobáceas vítreas de color violeta a rosado; la parte media consiste de una espesa secuencia de limolitas verde - rojizas, arenisca ínter estratificadas con tobas, y localmente algunas calizas. La sección superior consiste de limolitas y areniscas rojas con estratificación cruzada y rizaduras (Ghosh et al., 1996).

### **Formación Río Negro.**

La secuencia del Cretácico en la Cuenca de Maracaibo, comienza con la Formación Río Negro, esta formación consiste de conglomeradas oligomícticos y areniscas que descansan discordantemente sobre formaciones más antiguas tales como la Formación La Quinta y las asociaciones Mucuchachí/Tostosa. Los conglomerados de Río Negro tienden a mostrar un carácter de afinamiento hacia el tope y pueden terminar en lutitas impuras laminadas (Ghosh et al., 1996).

### **Grupo Cogollo.**

La depositación continental de la Formación Río Negro culminó debido a la transgresión marina que inundó la plataforma Cratónica de Guayana (Parnaud et al., 1995). A comienzos del Aptiense, las aguas marinas progresaron cubriendo extensas áreas donde se desarrollaron ambientes marinos someros representados por las calizas del Grupo Cogollo, subdividido éste en las formaciones Apón, Lisure y Maraca.

**La Formación Apón** está subdividida en cuatro miembros: Tibú, Guáimaras, Machiques y Piché, dicha formación está compuesta por calizas nodulares con intercalaciones de lutitas negras, en un área de ambiente francamente marino.

**La Formación Lisure** consiste en areniscas glauconíticas de grano medio a fino, de color gris azulado a gris verdoso, calizas arenosas glauconíticas laminadas,

areniscas micáceas que alternan con lutitas arenosas - arcillosas de color gris azulado, calizas glauconíticas y algunas calizas lutíticas (L.E.V., 1997). Según González de Juana et al., (1980), la presencia de areniscas y glauconita es el principal elemento que la diferencia del resto de las formaciones del Grupo Cogollo.

**La Formación Maraca** se sedimentó durante el Albiense Tardío, en todo el occidente de Venezuela como una caliza con poco espesor de ambiente marino y facies de aguas llanas. También se distinguen de otras ya que la constituyen calizas bioclásticas coquinoideas macizas, con algunas intercalaciones de capas delgadas de margas y lutitas de color gris y ocre claros (González de Juana et al., 1980). Además, pueden presentar oides y granos cubiertos, y algunos granos angulares de cuarzo, fosfato y pirita. Las calizas se asemejan a la de los miembros Piché y Tibú de la Formación Apón.

#### **Formación La Luna.**

Consiste en calizas y lutitas calcáreas fétidas (típicamente), con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa, delgadamente estratificadas y laminadas, densas de color gris oscuro a negro, la ftanita negra es frecuente en formas de vetas, nódulos y capas delgadas. Muchas de las concreciones tienen amonites y otros microfósiles en su interior (L.E.V., 1997).

#### **Formación Colón.**

A finales del Cretácico se produjo la sedimentación de las calizas del miembro Socuy de la Formación Colón y sobre la secuencia calcárea se depositaron las lutitas de la Formación Colón - Mito Juan. La sedimentación de la Formación Colón fue rellenando la cuenca hasta el Maestrichtiense Tardío donde comienzan a aparecer los intervalos arenosos de la Formación Mito Juan (Parnaud et al., 1995).

### **Formación Mito Juan.**

Al final del Cretácico, la anfosa de Perijá fue rellenada con los sedimentos de nivel alto de la Formación Mito Juan. Las capas superiores de esta unidad se encuentran erosionadas, sugiriendo una pulsación tectónica en el área de Perijá a fines del Cretácico. La estratigrafía de la Formación Mito Juan es interpretada como muy arenosa (Cooney y Lorente, 1997).

### **Formación Guasare.**

La Formación Guasare posee un ambiente marino nerítico, el cual estuvo sujeto a influencias de tipo deltáico, especialmente hacia el suroeste, donde se observa la interdigitación de la típica litología de Guasare con los sedimentos del Grupo Orocué. La litología de Guasare consiste principalmente en lutitas grises oscuras, arenosas, macizas o laminadas, areniscas calcáreas y glauconíticas, limolitas y arcillitas, y en menor proporción caliza arenosa gris y algunas capas muy delgadas de carbón. Esta litología es representativa de la transición lateral, a los sedimentos deltáicos del Grupo Orocué, (González de Juana et al., 1980).

### **Formación Misoa.**

Esta formación tradicionalmente considerada como deltáica, ha sido recientemente interpretada como marino somero (Higgs, 1993, Parnaud et al., 1995). El escenario depositacional para la formación Misoa según Higgs (1997), fue el de una plataforma con buzamiento al NE. Higgs (1997), señala también que los depósitos de esa plataforma de Misoa deben pasar al SO en un cinturón (diacrónico) de depósitos costeros solapados por debajo del actual borde suroccidental del Lago de Maracaibo.

Las características de los sedimentos de la Formación Misoa, dependen de su posición en la cuenca, del ambiente de sedimentación, de la distancia entre ellos y de la fuente de los mismos. Hacia el noroeste hay más lutitas y areniscas de grano fino, mientras que hacia el sur y sureste el porcentaje de arena aumenta al 80% y 90% de la sección, y los granos se hacen más gruesos.

A continuación se presenta un análisis de las unidades estratigráficas objetivos del presente trabajo:

#### **Unidad “C-4”**

Constituye una de las unidades de mayor interés desde el punto de vista de su prospectividad y su mayor contenido de capas arenosas, destacándose que desde esta posición estratigráfica y hacia las unidades infrayacentes C-5, C-6 y C-7, la relación arena/lutita se incrementa, luciendo además alta prospectividad. Presenta un espesor promedio de 500'. Litológicamente está constituida por una secuencia lutítica hacia la base y parte intermedia con algunos lentes arenosos de poco espesor intercalados. La sección superior presenta una secuencia de depósitos arenosos con espesores que oscilan entre los 10 y 30 pies, llegando a alcanzar hasta 100 pies. Es notorio que en dirección al oeste la calidad de las arenas se incrementa, destacándose al este una pérdida en cuanto al espesor de los depósitos y la relación arena-lutita, luciendo mayor arcillosidad.

#### **Unidad “C-5”**

Con esta unidad continúa el incremento de la relación arena/lutita, distinguiéndose importantes depósitos arenosos, resaltando la poca continuidad lateral de los mismos. Litológicamente esta unidad comienza en la base con un cuerpo lutítico de unos 40' de espesor aproximado, que sirve de excelente marcador estratigráfico. Por encima de este marcador se desarrolla una secuencia alternada de

capas de areniscas y lutitas. Las arenas revisten un carácter marcadamente lenticular con altas variaciones laterales.

### **Unidad “C-6”**

Se verifica con esta unidad el predominio de los cuerpos arenosos sobre las capas lutíticas. Al igual que en C-5, el desarrollo arenoso se muestra muy heterogéneo. Así se tiene que el pozo LLB0015 hacia el tope de C-6, penetrada parcialmente, presenta un cuerpo de arenisca de 50' de espesor aproximado, limpio y prospectivo por debajo del que se identifica una sección lutítica de 60' que separa el cuerpo superior del inferior. Este último con un espesor de 100', está conformado por tres lentes arenosos, prospectivos intercalados con capas delgadas de lutita.

En el área más hacia el oeste, la unidad C-6 se caracteriza por una fuerte intercalación de estratos de arenisca y lutita con una distribución de fluidos compleja al mostrar lentes con alta saturación de agua y otros con hidrocarburos.

### **Formación La Rosa.**

Fue sedimentada durante la fase transgresiva del Mioceno Medio, esta formación representa un marcador marino que puede extenderse en toda la cuenca (Ghosh et al., 1988), aunque no se tiene suficiente evidencia al sur de la misma.

La arena basal La Rosa constituye la parte más vieja de la Formación La Rosa y había sido interpretada tradicionalmente como depósitos marinos, pero realmente representa la sedimentación durante un sistema encadenado de nivel bajo. En algunos casos estas arenas están depositadas sobre arenas eocenas produciendo un efecto coalescente. La Formación La Rosa, incluye hacia la parte media y superior la lutita de La Rosa, una unidad depositada en un ambiente marino profundo como parte de un evento transgresivo (Parnaud et al., 1995).

### **Formación Lagunillas.**

También perteneciente al Mioceno, la Formación Lagunillas consiste en areniscas poco consolidadas, arcillas, lutitas y algunos lignitos. Esta formación está subdividida en cuatro miembros: Lagunillas Inferior, Ojeda, Laguna y Bachaquero. Las características individuales de los miembros reflejan el cambio de ambiente marino somero a deltáico y fluvial (L.E.V., 1997).

### **Formación La Puerta.**

Tuvo su origen en el Mioceno Tardío en un ambiente dominado por agua dulce. La Formación La Puerta, se caracteriza por arcillas moteadas, areniscas de grano fino y arcillosas, subgrauvacas y en menor proporción se encuentran areniscas en parte conglomeráticas y limolíticas gris verdosas muy poco consolidadas (L.E.V., 1997).

### **Formación Onia.**

Por encima de los depósitos de La Puerta se consigue discordantemente una secuencia de sedimentos jóvenes de carácter no marino en las partes sur y central de la Cuenca de Maracaibo que pertenecen a la Formación Onia (Plioceno), la cual está constituida desde la base al tope por areniscas y limolitas abigarradas gris verdoso, de grano grueso a fino, arcillosas, micáceas y friables, localmente con capas calcáreas delgadas de color amarillo. (L.E.V., 1997).

### **Formación El Milagro.**

Los depósitos aluviales de la edad reciente se encuentran en contacto suprayacente con los sedimentos de la Formación El Milagro, la cual presenta facies de aguas dulces y llanas, depositados a una distancia considerable del área fuente. Algunos autores consideran que el ambiente de sedimentación de la Formación El

Milagro es fluvio-deltaico y lacustrino marginal depositados sobre un amplio plano costanero y de poco relieve.

DESCRIPCION LITOLOGICA	LITOLOGIA	UNIDADES GEOLOGICAS	EDAD
DEPOSITOS ALUVIONALES		DEPOSITOS ALUVIONALES	RECIENTE
ARENISCAS FRIABLES Y ARENAS NO CONSOLIDADAS CON ESTRATIFICACION CRUZADA DE GRAHO FINO A CONGLOMERADO		FORMACION EL MILAGRO	PLEISTOCENO
ARCILLAS LIMOLITICAS GRIS CLARO Y PARDO		FORMACION OMA	PLIOCENO
ARCILLAS ABIGARRADAS Y ARENISCAS MASIVAS CON ESTRATIFICACION CRUZADA BANDAS FERRUGINOSAS		FORMACION LA PUERTA	MIOCENO
ARENISCAS POCO CONSOLIDADAS, LUTITAS Y ALGUIOS LIGHITOS		BACHAQUERO	
ARENISCAS POCO CONSOLIDADAS, LUTITAS Y ALGUIOS LIGHITOS		LAGUNA	
LUTITAS Y ARENISCAS LIMOLITICAS INTERCALADAS		OJEDA	
ARENISCAS INTERCALADAS CON ARCILLAS Y LUTITAS CARBONACEAS ABIGARRADAS		LAGUILLAS INFERIOR	
LUTITAS GRESAS MARINAS CON INTERCALACIONES LOCALES DE ARENAS		LUTITAS DE LA ROSA	
ARENA BASAL CON INTERCALACIONES DE ARCILLAS LAMINARES		SAITA BARBARA	
GRUESAS CAPAS DE LUTITAS FRECUENTEMENTE LIMOLITICA Y CARBONACEA INTERCALADAS CON ARENISCAS DURAS Y LIMOLITAS		ARENA B1 - B6	EOCENO
ARENISCAS MASIVAS DE GRAHO FINO CON INTERCALACIONES DE LUTITAS		ARENA B6 - B9	
ARENISCAS DE COLOR BLANCO, MAL ESCOGIDAS Y LUTITAS GRIS OSCURO A NEGRO, ARENOSAS O LIMOLITICAS		ARENA C1 - C3	
ARENAS MASIVAS DE GRAHO FINO BLANCAS Y GRISAS CON ALGUIAS INTERCALACIONES DE LUTITAS GRISAS A OSCURAS		ARENA C4 - C7	PALEOCENO
CALIZAS ARENOSAS FOSILIFERAS Y ARENISCAS CALCAREAS INTERCALADAS CON ARENISCAS DE GRAHOS FINOS		FORMACION GUASARE	
ARENAS		FORMACION MITO JUAN COLON	CRETACEO
LUTITAS MARINAS		LUTITAS DE COLOH	
CALIZAS FOSILIFERAS, ARENOSAS, INTERCALADAS CON ARCILLAS ARENOSAS Y LUTITAS CALCAREAS FRACTURADAS DE COLORES NEGRAS, GRISAS Y AZULADAS		SOCUY	
		FORMACION LA LUINA	
		MARACA	
	LISURE	GRUPO COGOLLO	
	APOH		
COGLOMERADO BASAL		FORMACION RIO NEGRO	
BASAMENTO IGHEO - METAMORFICO			

Figura 5. Columna tipo del área de estudio. Tomado de Salazar (2000)

## CAPITULO II.

### VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

#### *Carga de los datos sísmicos y de los datos de pozos*

El proyecto de pozos utilizado lleva por nombre *LMA\_VLA\_ATICO* y el proyecto sísmico tiene el nombre de *hfi\_lma*. Estos dos proyectos fueron cargados y trabajados en el ambiente integrado de *Landmark*<sup>TM</sup>. Para los años de 1997 y 1998, la compañía Veritas realizó un “merge” de los datos sísmicos de todo el Lago de Maracaibo en donde se encuentran los bloques I y XII pertenecientes a la Unidad de Explotación Lagomar, dando como resultado un levantamiento sísmico con nombre de **Lagomar 3D-Merge**. En el año de 2003, la compañía Geotrace realizó un reprocesamiento de todo el levantamiento sísmico y aplicó la técnica de recuperación de altas frecuencias **HFI** (por sus siglas en inglés) dando como resultado el proyecto sísmico *hfi\_lma*. Dicho reprocesamiento cubrió un área de 940 km<sup>2</sup> aproximadamente.

Para este proyecto, se usaron un total de 85 pozos (figura 5) distribuidos de la siguiente manera: 37 pozos en el Bloque I, 34 en el Bloque XII, 5 en el Bloque Lama Bloque XIV y 6 en el Bloque UD Lama. Cabe destacar, que los pozos ubicados en los Bloques XIV y en el Bloque UD Lama, solo sirvieron como pozos de control estructural en el momento de la interpretación sísmica, por lo tanto para la identificación y clasificación de las facies sísmicas no fueron usados por estar fuera del área de interés. Se cargaron un total de 762 curvas de registros petrofísicos validando para los estudios solos aquellas que penetraron las unidades C-4, C-5 C-6 y el tope de la Formación Guasare.

De igual forma, la información correspondiente a los topes geológicos de cada uno de los pozos fue suministrada por el geólogo de la unidad de E.I Lagomar. Para



estratigráfica. Para espesores inferiores al límite de resolución, la variación del espesor de la capa se traduce en pequeñas variaciones de tiempo o de la forma de la ondícula de reflexión. (Noguera, 1983)

En un caso como éste la única información relacionada con el espesor de la capa está contenida en la amplitud de la ondícula reflejada. La resolución está finalmente relacionada con la longitud de onda la que a su vez es una función de la velocidad y de la frecuencia dominante.

### ***Cálculo de la resolución sísmica vertical***

En el cálculo de la resolución sísmica vertical se tomaron en cuenta los pozos VLA-0833 y LLB0025, por ser éstos candidatos a realizárseles el sismograma sintético. Para dicho cálculo se empleó la siguiente fórmula:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{V_{\text{int}}}{4f_{\text{dom}}}$$

en donde  $V_{\text{int}}$  es la velocidad interválica del horizonte de interés y  $f_{\text{dom}}$  es la frecuencia dominante extraída en el espectro de amplitud de los datos sísmicos usando la herramienta *PostStack Pal*® en una ventana de tiempo desde los 2200 ms hasta los 2550 ms para el pozo LLB0025 y desde los 1700 ms hasta los 2000 ms para el pozo VLA0833. Los resultados obtenidos de estos cálculos se visualizan en las figuras 7 (pozo LLB0025) y en la figura 8 (pozo VLA0833)

Por otra parte, la velocidad interválica para las arenas C-4 y C-5 se calculó con la siguiente fórmula:

$$V_{\text{int}} = 2000 * \left( \frac{\text{topeA} - \text{topeB}}{\text{tiempoA} - \text{tiempoB}} \right)$$

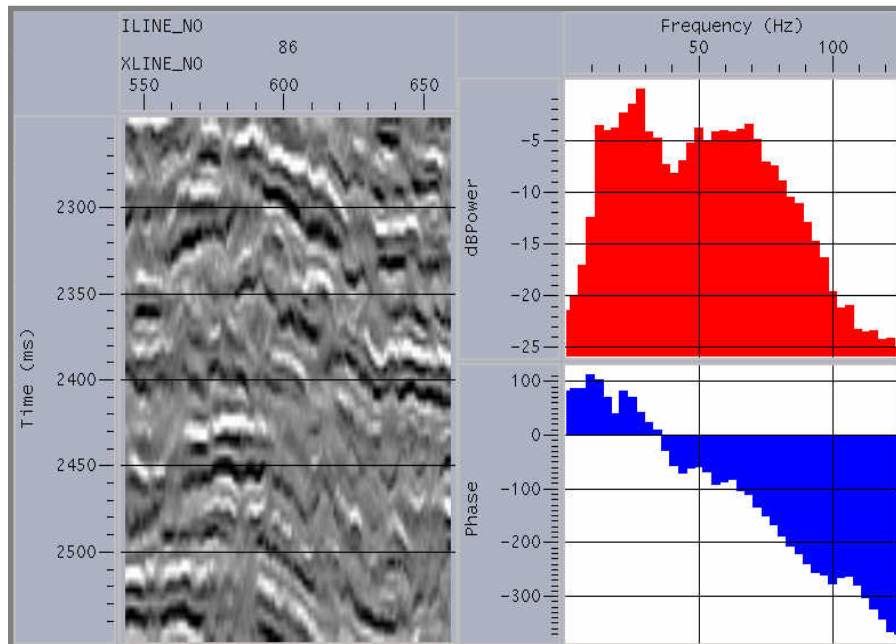


Figura 7. Espectro de amplitud extraído en las adyacencias del pozo LLB0025, en una ventana de tiempo que abarca desde 2200 ms hasta 2550 ms. En éste se puede observar el valor de frecuencia dominante para la sísmica HFI.

todas estas fórmulas arrojaron los resultados que se presentan a continuación:

<i>Horizonte</i>	<i>frec dom (Hz)</i>	<i>Vint (ft/seg)</i>	<i>λ/4(ft)</i>
Arena C-4	30	12981	108
Arena C-5	30	12600	105

Tabla 1. Valores de la resolución sísmica vertical del área calculada en el pozo LLB0025

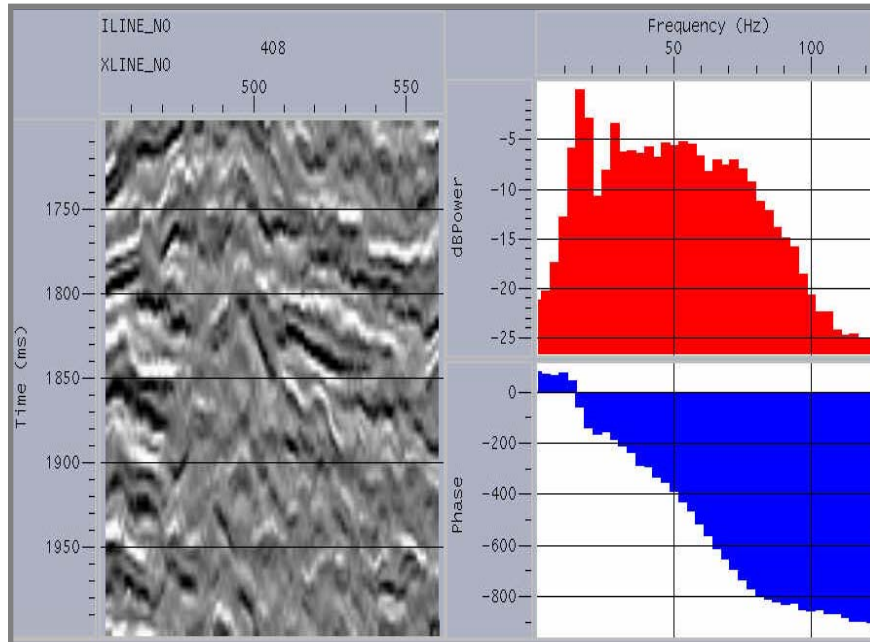


Figura 8. Espectro de amplitud extraído en las inmediaciones del pozo VLA0833, en una ventana desde los 1700 ms a los 2000 ms. Se puede observar un pico anómalo en las frecuencias debido a lo caótico de la sísmica HFI.

<i>Horizonte</i>	<i>FREC dom (Hz)</i>	<i>Vint (ft/seg)</i>	<i><math>\lambda/4</math></i>
Arena C-5	28	10880	97

Tabla 2. Valores de la resolución sísmica vertical del área calculada en el pozo VLA0833

### *Correlaciones estratigráficas*

Al comenzar todo estudio de interpretación sísmica, es necesario tener definido de manera bien clara cada uno de los topes geológicos o marcadores involucrados, es decir, identificar de forma precisa las profundidades a las cuales se encuentra las unidades estratigráficas de interés. Este trabajo se hace con la ayuda de los registros de Gamma Ray, SP, Resistividad, con los cuales se pueden correlacionar los reservorios o arenas de interés.

Estas correlaciones se hicieron con la ayuda del geólogo de la unidad y con los topes oficiales que se encontraban disponibles. Dichas correlaciones se llevaron a cabo en direcciones preferenciales, perpendicular y paralela al rumbo de las fallas existentes en la zona. Esto tiene como objetivo principal ser más consistente en el criterio de correlación. Los topes correlacionados corresponden a las unidades estratigráficas de la Discordancia del Eoceno, la cual es un marcador muy claro de reconocer en los registros en toda la cuenca, el tope de la Formación Guasare, también fácilmente reconocible, tope de la arena C-4, correspondiente a una superficie de máxima de inundación (MFS), tope de C-5 y tope de C-6. Todas estas arenas pertenecen a la Formación Misoa. La correlación realizada fue de tipo estructural, ya que con ésta se puede tener una mejor visualización de la configuración estructural en el nivel de los topes interpretados

### *Sismograma sintético*

Otra de las principales herramientas que se usan en un estudio de interpretación sísmica es el sismograma sintético. Dicha herramienta ayuda con la calibración de la sísmica y la información de pozo que se tiene disponible. Dicho esto, se puede definir un sismograma sintético como la reconstrucción de una traza sísmica en la dirección del pozo, mediante el empleo de los registros de densidad y sónico. Para elaborar una traza sísmica sintética en el pozo, basta con tener la función de los coeficientes de reflexión para cada profundidad. Dichos coeficientes se obtienen a partir de los registros de velocidad y densidad del pozo. (Schlumberger, 1984)

La función de velocidad se obtiene a partir del registro sónico, el cual viene expresado en unidades de microsegundos por pie, por lo que su inverso multiplicado por una constante de conversión, se transforma en velocidad interválica expresada en metros por segundo. Por otra parte, la curva continua de densidad se obtiene

directamente del registro de densidad del pozo, normalmente expresado en gramos por centímetro cúbico. (Schlumberger, 1984)

Habiéndose obtenido estos dos elementos fundamentales, sónico y densidad, se obtienen las funciones de los coeficientes de reflexión en profundidad. Es necesario realizar la conversión tiempo- profundidad para que la escala del sismograma este en tiempo doble de viaje sísmico, tal como vienen representadas las secciones sísmicas. Para lograr esto, se va a emplear un tercer elemento que son los disparos sísmicos de verificación. Estos disparos sísmicos se realizan con el objeto de medir los tiempos de viaje del pulso sísmico desde la superficie hasta diversas profundidades, generalmente en cambios litológicos importantes. El resultado de los disparos sísmicos es una tabla de valores tiempo- profundidad, los cuales una vez verticalizados y mediante el empleo del registro sónico, van a permitir calcular la conversión continua y exacta tiempo-profundidad (Schlumberger, 1984)

### ***Elaboración de los sismogramas sintéticos.***

La elaboración del sismograma sintético constituye uno de los pasos más importantes en un estudio de interpretación sísmica, ya que en este se logra la calibración de los datos sísmicos, que se encuentran en tiempo, con los datos de pozos, que se encuentran en profundidad. Con el sismograma sintético se reconocen los horizontes de interés que se ven en la sísmica asociados a los topes geológicos correspondientes, que se reconocen en los pozos. Como se describió anteriormente, para la realización del sismograma es necesario tener pozos con tiros de verificación sísmica (“check-shot”) con los cuales se logrará corregir los errores de los registros sísmicos por causa de ruidos y distorsiones, producto de efectos de dispersión, condiciones del pozo, invasiones del lodo, entre otros.

La generación del sismograma como tal se llevó a cabo con el uso del módulo *Syntool*® de la plataforma *OpenWorks*®. Dicho módulo requiere la carga de las

curvas tiempo-profundidad (TZ) y la del registro de densidad, habiéndose cargado esto, el programa genera los coeficientes de reflexión y por último el sintético como tal. En el área de estudio se seleccionaron 2 pozos que cumplieron con los requisitos para la elaboración del sismograma sintético. Estos pozos fueron: VLA-0833 y el LLB-0025. Las siguientes figuras muestran las gráficas de tiempo-profundidad (TZ) correspondiente a cada uno de los pozos:

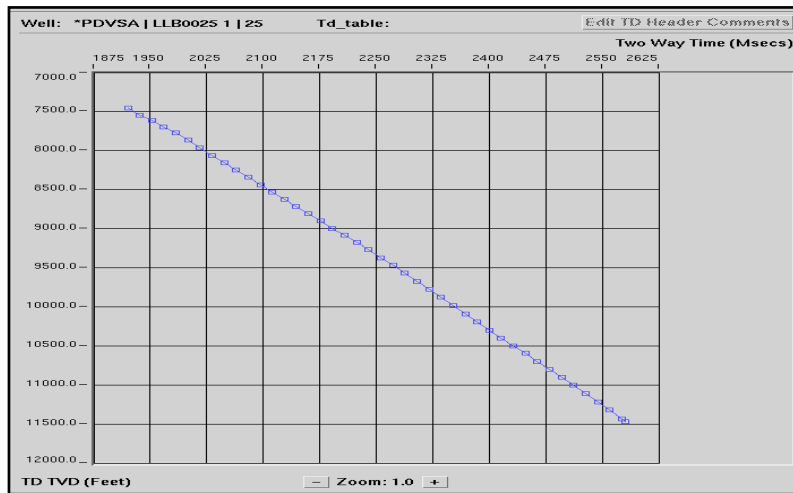


Figura 9. Gráfica de conversión tiempo-profundidad para el pozo LLB0025

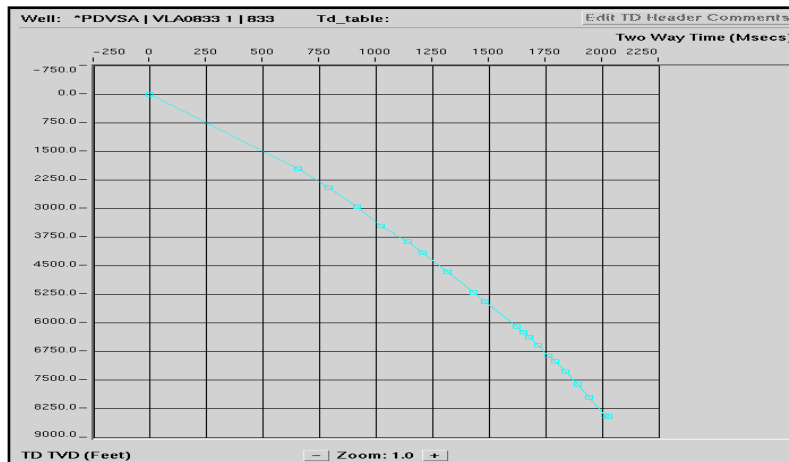


Figura 10. Gráfica de conversión tiempo-profundidad para el pozo VLA0833

Los sismogramas sintéticos resultantes se pueden observar en las figuras 11 y 13 que se presentan a continuación. De igual forma, se observa a cada uno de los pozos en su respectiva sección sísmica con el sismograma generado, en éstas se

pueden reconocer los reflectores sísmicos asociados a los topes geológicos interpretados.

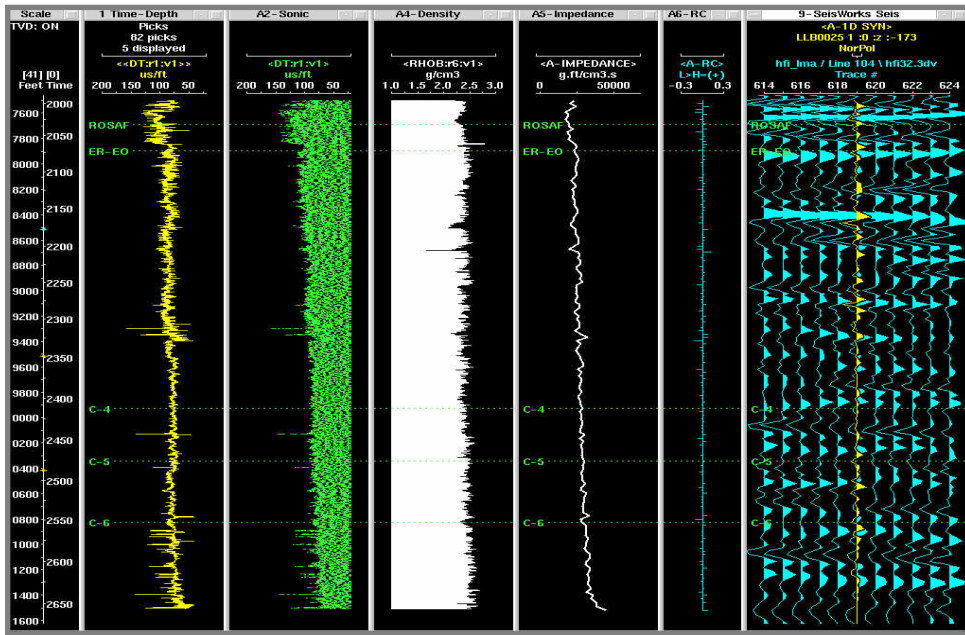


Figura 11. Sismograma sintético generado para el pozo LLB0025.

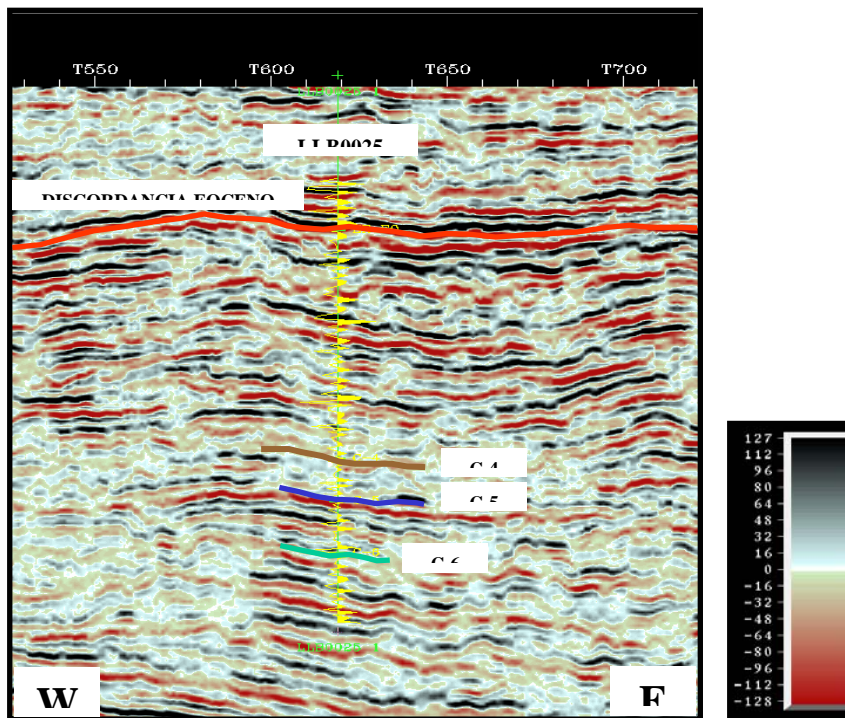


Figura 12. Línea sísmica E-W mostrando el sismograma sintético generado en el pozo LLB0025

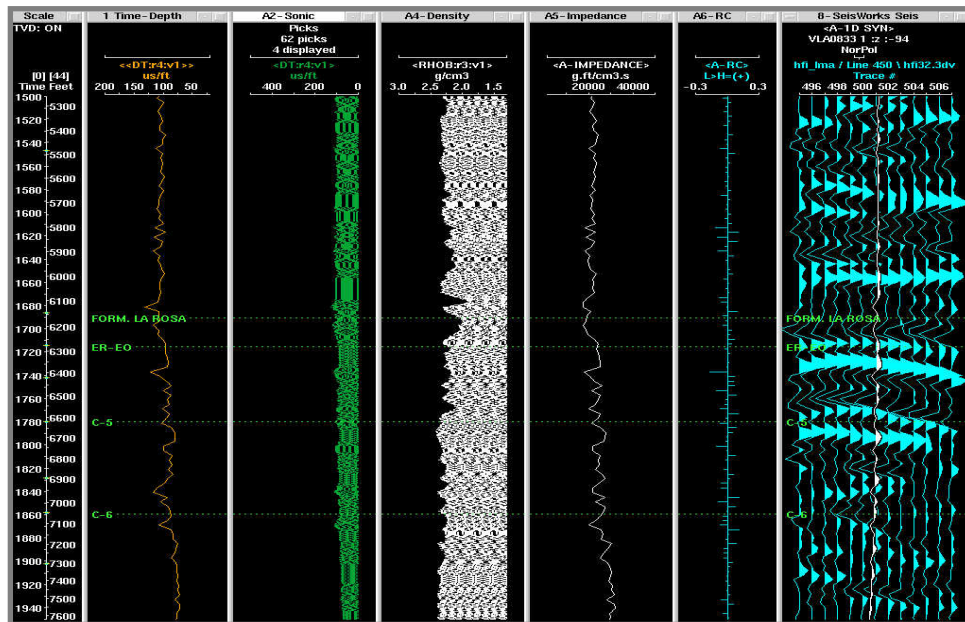


Figura 13. Flujo de trabajo usado en Syntool para generar el sismograma sintético al pozo VLA0833.

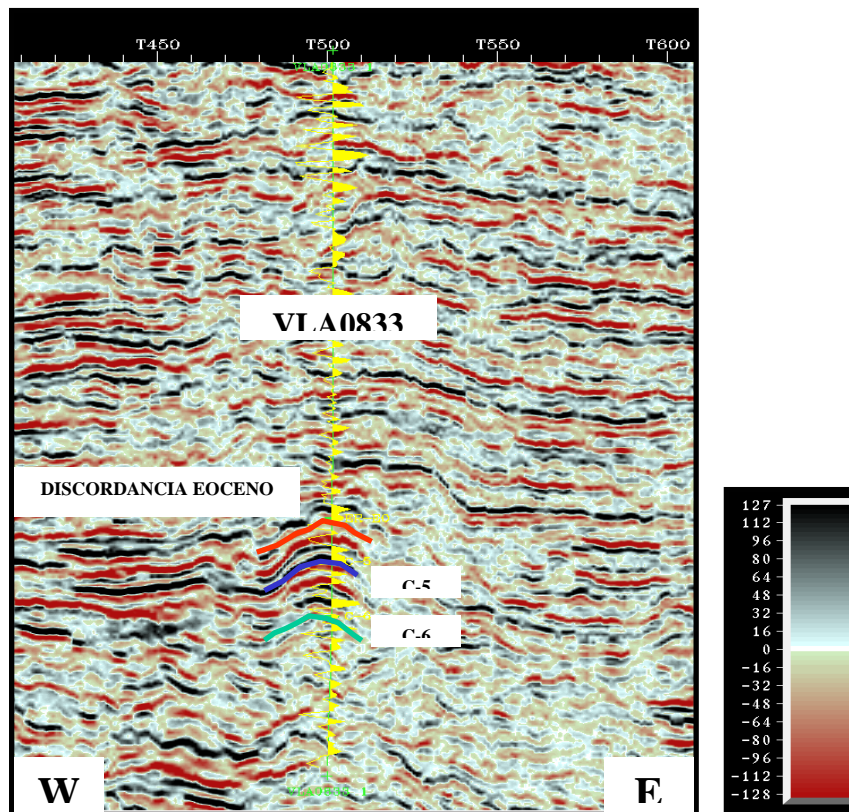


Figura 14. Línea sísmica E-W mostrando el sismograma sintético generado para el pozo VLA0833

Luego de generar los sismogramas sintéticos, se pudieron identificar cada uno de los reflectores sísmicos con los que se estaba realizando la calibración y así poder reconocer cual es la respuesta sísmica de cada uno de estos reflectores. Los resultados son los siguientes: la Discordancia del Eoceno y el tope de la Formación Guasare en el sismograma sintético estuvieron asociados a un pico ó máximo de amplitud positiva de la ondícula. Después de haber reconocidos estos fuertes marcadores se identificaron los horizontes intraeoceno de interés, en este caso tope de C-4, de C-5 y C-6, los cuales dieron como respuesta un máximo, un mínimo y un máximo respectivamente.

### **CAPITULO III.**

#### **INTERPRETACION SISMICO-ESTRUCTURAL**

##### *Consideraciones teóricas*

El método sísmico de reflexión se ha constituido en la técnica geofísica mayormente utilizada en la exploración y producción de hidrocarburos, dada su capacidad de resolución y penetración, la cual permite obtener una imagen de la disposición de los estratos en el subsuelo. Si bien es cierto que la resolución vertical del método sísmico de reflexión no es comparable con el casi ilimitado poder de resolución de la geología de superficie, en cuanto a continuidad y espesor de los estratos, no es menos cierto que es la única herramienta que permite inferir variaciones laterales en forma efectiva, dado que los registros de pozos ofrecen información puntual (Diamont, 1996).

Dicho método consiste en generar, en superficie, ondas corpóreas u ondas sísmicas por medio de una fuente que en general pueden ser explosivos, vibradores, cañones de aire, etc., ser recibidas en superficie por una serie de receptores mejor conocidos como geófonos, en caso de estar en tierra, o hidrófonos en caso de estar en medios acuosos y luego efectuar las mediciones de la información con un equipo diseñado para tal fin, como lo es el sismógrafo.

Los métodos sísmicos, tanto de reflexión como los de refracción, están basados en la teoría de la elasticidad; la cual define que las propiedades elásticas de las rocas están caracterizadas por sus respectivos módulos elásticos, y éstos a su vez relacionan entre sí al esfuerzo y la deformación. (Parasnis, 1962)

Por consiguiente se considera que un medio es elástico cuando es capaz de recuperar su forma una vez que ha cesado el estado de esfuerzos al que fue sometido. Si los esfuerzos aplicados son suprimidos de forma repentina, el estado de

deformación se propaga a través del medio como un frente de onda elástica esférica, siguiendo el principio de Huygens, es decir, cada punto del frente de onda origina un nuevo frente de onda que también se propaga de forma esférica. (Diamont, 1996)

De la teoría de la elasticidad se llega a que en un medio elástico pueden existir varios tipos de ondas, pero de las cuales las ondas compresionales u ondas “P” y las ondas transversales u ondas “S” son las principales. Las primeras tienen un desplazamiento paralelo a la dirección de propagación del frente de onda con una velocidad:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del medio y los parámetros de Lamé están definidos por los símbolos  $\mu$  y  $\lambda$ .

Las segundas tienen un desplazamiento perpendicular a la dirección del frente de onda con una velocidad:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del medio y los parámetros de Lamé están definidos por los símbolos  $\mu$  y  $\lambda$ .(Diamont, 1996)

Habiendo aclarado lo referente a los principales tópicos de los métodos sísmicos, se puede entonces hablar de lo que es en esencia la interpretación sísmica 3D. Dicha interpretación es el proceso mediante el cual se logra la integración de datos sísmicos, geológicos y petrofísicos con el objetivo de generar los modelos estructurales y sismoestratigráficos del subsuelo para la búsqueda de hidrocarburos.

Por otra parte, la interpretación sísmica 3D se diferencia de la convencional sísmica 2D, debido al volumen de información manejada y a las posibilidades de visualización de pequeñas estructuras producto de su mayor densidad de líneas.

***Interpretación de fallas.***

En un primer paso para la realización de la interpretación de los horizontes de interés, es necesario tener una visión del marco estructural en donde se va a trabajar. En primer lugar se realiza la interpretación de las principales fallas que se encuentran en el área. Para lograr esto es necesario revisar los modelos estructurales propuestos en la zona.

Según Bueno (1996), la zona de estudio está constituida por un alto estructural a nivel del Eoceno de rumbo NNE y buzamiento generalmente SSE. Estructuralmente pueden definirse tres sistemas de fallas en el área de interés. Por una parte tenemos al sistema de rumbo NNE-SSO, el cual consiste en fallas regionales que delimitan al alto estructural en sus flancos occidental y oriental (figura 15) En su parte occidental se trata de la Falla de Icotea, cuyo buzamiento es normal hacia el oeste y en la parte oriental se trata de la Falla “Este de Lama”, de buzamiento normal hacia el este. La Falla de Icotea está acompañada en su flanco este por la Falla del Atico, la cual es una falla sintética convertida en retrocorrimiento por la inversión estructural durante el Eoceno (figura 16)

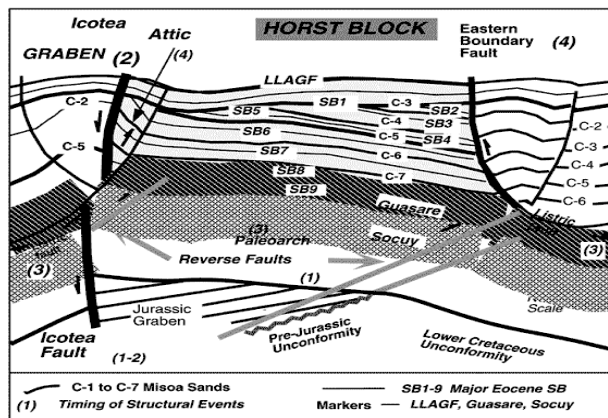


Figura 15. Esquema del marco estructural explicado por Bueno (1996)

De igual forma, el mismo autor habla de un segundo sistema de fallas normales de rumbo ONO-ESE que localmente varía a NNO-SSE, cortando al alto en escalones. Dichas fallas tiene generalmente buzamiento norte, pudiendo localmente estar acompañadas por fallas de buzamiento sur, con las cuales forman grabens. Los sistemas anteriores están cortados por un tercer sistema, el cual solo puede ser detectado por una interpretación muy densa, dicho sistema consiste en cizallamientos conjugados, de edad probablemente Mioceno, donde provocan el zigzagueo del rumbo de las fallas de los otros sistemas.

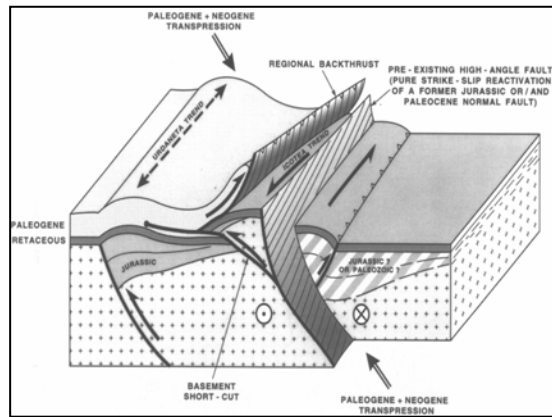


Figura 16. Diagrama estructural del Bloque I. Explicado por Bueno (1996) Tomado de Roure et al. (1997)

Existen diversos anticlinales de dirección preferencial NNE paralelos y cercanos a las fallas próximas a las crestas de los mismos, constituyendo un rasgo generalizado en toda la Cuenca. Estas fallas son sistemas mayores que han sido reactivados e invertidas durante los diferentes regímenes tectónicos que afectaron la Cuenca y su relleno sedimentario; son elementos estructurales que no mueren, sino que por el contrario acomodan la orientación del desplazamiento de los bloques adyacentes acorde con los sistemas de esfuerzos que se estén imponiendo a través del tiempo. (Briceño, 1999). En el sistema de Fallas de Icotea se encuentra un sistema de fallas longitudinales subparalelas a la falla principal y un sistema de fallas transversales presentes en toda la parte central del lago.

Una vez discutido el modelo estructural propuesto para la zona, se procedió a la interpretación de las fallas. Esto se llevó a cabo en la aplicación *Seisworks*® del ambiente integrado *Openworks*® de la plataforma *Landmark*™. También se usó la aplicación *EarthCube*® para la visualización del cubo sísmico completo y ver las discontinuidades de los horizontes de interés, lo cual da indicios de zonas falladas. El trabajo como tal de interpretación de las principales fallas, como los sistemas de fallas de Lama-Icotea y Lama-Este, se realizó cada 5 líneas (líneas sísmicas con dirección E-W) y cada 5 trazas (líneas sísmicas con dirección N-S) por la complejidad geológica de la zona. La interpretación a lo largo de las líneas fue que aportó la mejor definición de las fallas mencionadas, por tener estas una dirección transversal e inclusive ocasionalmente ortogonal al rumbo de las fallas citadas.

Y para los sistemas de fallas con rumbo NO-SE se usaron líneas arbitrarias con dirección NE-SO teniendo un espaciamiento entre sí adecuado para poder hacer un seguimiento de las fallas. Este trabajo fue apoyado con el uso de los “*time slices*” del cubo de coherencia (figura 17) a distintas profundidades en tiempo para poder identificar mejor el rumbo y buzamiento de cada una de las fallas. En total se interpretaron 41 fallas en toda el área.

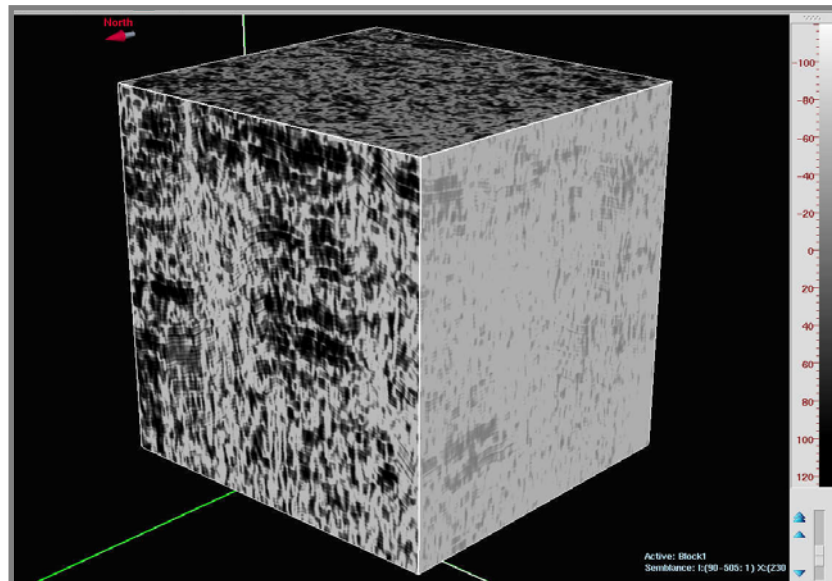


Figura 17. Cubo sísmico de coherencia generado en el área de estudio para visualizar las fallas presentes en la zona.

En la figura 18 se puede observar la interpretación hecha a los sistemas de fallas principales de la zona, esta interpretación se hizo con la ayuda del cubo de coherencia presentado anteriormente. Por otra parte, una primera interpretación de estas dos grandes fallas ayudaron a visualizar el contexto estructural en donde se estaba trabajando. Se puede agregar también, que estas fallas son muy antiguas (Jurásico) que nacen en el basamento sísmico y por los efectos a los cuales estuvo expuesta la cuenca dieron origen a las fallas sintéticas y antitéticas asociadas a éstas.

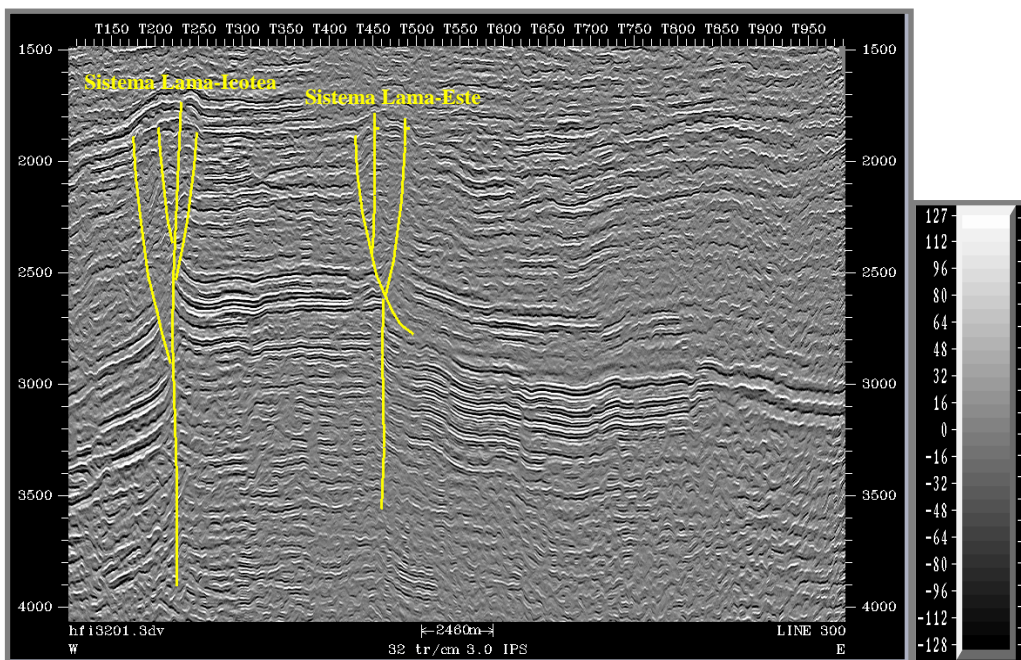


Figura 18. Línea sísmica en dirección E-W en donde se muestran los principales sistemas de fallas que fueron interpretados en el área de estudio.

### *Interpretación de horizontes*

El trabajo de interpretar un horizonte o reflector sísmico se basa en dos aspectos fundamentales los cuales son la continuidad lateral y la correlación de dicho horizonte. La continuidad se puede definir como el reconocimiento de un mismo evento en trazas o líneas sísmicas sucesivas, y la correlación se pudiera definir como

el reconocimiento de patrones o formas de la traza sísmica como la fase o la amplitud.

Una vez hecha la calibración de la sísmica con los pozos y la interpretación de las principales fallas existentes en la zona, se procedió a la interpretación de los horizontes de interés. Para esto se usó la aplicación *SeisWorks*® de la plataforma *Landmark*™, mediante la opción *Autotracking*.

En un primer paso se empezó a interpretar en las líneas sísmicas que atraviesan los pozos VLA0833 y LLB0025, ya que a estos pozos se les realizó el sismograma sintético y por ende se puede llevar un mejor control de los datos sísmicos. Realizado esto, se fue extendiendo la interpretación sistemáticamente a toda el área en un mallado denso (cada 5 líneas y trazas) para cada uno de los horizontes de interés. Luego con la opción “*Interpolate*” se interpoló cada mallado para generar los mapas estructurales en tiempo.

Los horizontes definidos como la Discordancia del Eoceno (ER-EO) y el tope de la Formación Guasare (ER-PC) son unos marcadores regionales muy fuertes y evidentes por la relación angular entre los horizontes en contacto por la discordancia, por lo cual la interpretación de éstos no tuvo mayor inconveniente e inclusive sirvieron para montar la información de los pozos, pero para las arenas C-4, C-5 y C-6 el seguimiento fue un poco más dificultoso. Esto está relacionado al tipo de ambiente en el cual se depositaron, de esto se hablará más adelante. Es por ello que cabe destacar que en aquellas zonas en donde la resolución de la sísmica era escasa, para la interpretación de dichos horizontes fue necesario la realización de polígonos de correlación, esta opción de la aplicación *SeisWorks*®, ayuda a llevar espesores constantes de la secuencia de interés, tomando como referencia a los buenos reflectores. Los resultados de la interpolación de cada uno de los horizontes objetivos pueden verse en las figuras 19, 21, 23, 25 y 27 que se presentan a continuación.

En cuanto a la Discordancia del Eoceno, está fue interpretada como un pico máximo de amplitud positiva de la traza sísmica. En el mapa estructural en tiempo (figura 20) se observaron tiempos que oscilaron entre los 1420 ms, hacia el norte, a los 2064 ms, en el sureste, esto reflejo una superficie con un buzamiento hacia el sureste. Los mayores problemas en el momento de su interpretación se presentaron en aquellas zonas en que los sistemas de fallas Lama-Icotea y Lama-Este ejercían mayor influencia dando como resultado en el mapa estructural en tiempo el alineamiento de dichos sistemas.

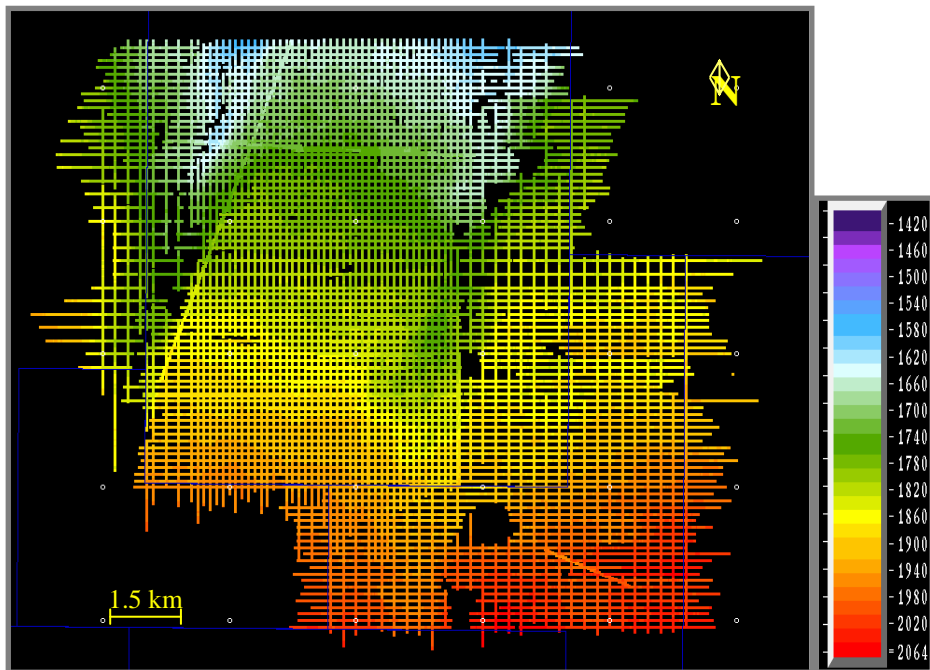


Figura 19. Mallado generado de la interpretación del horizonte correspondiente a la Discordancia del Eoceno.

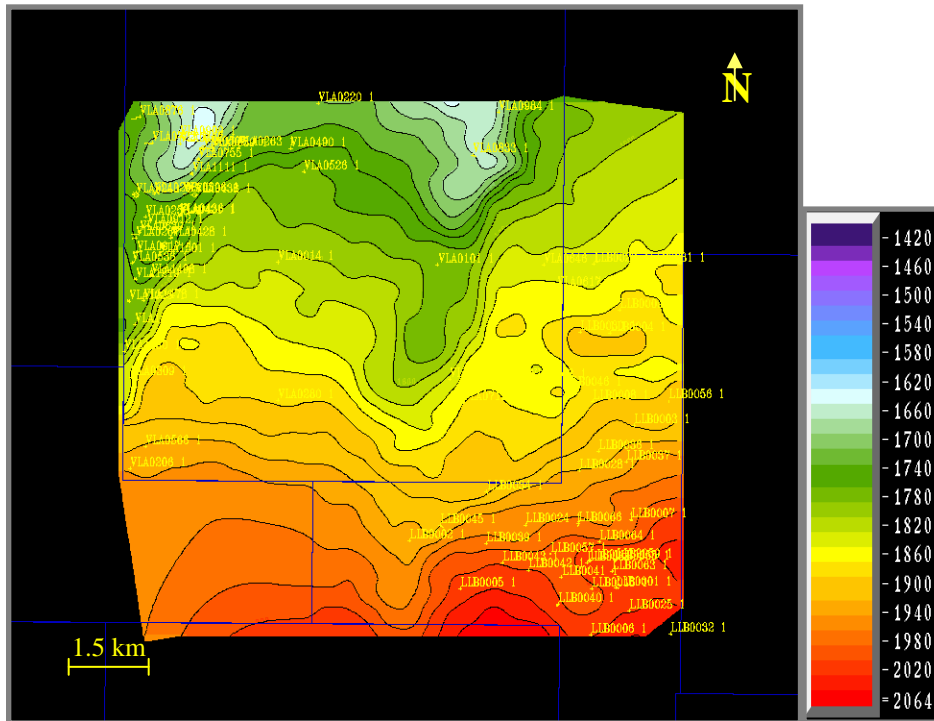


Figura 20. Mapa estructural en tiempo de la Discordancia del Eoceno, mostrando los pozos usados para este estudio y los cambios abruptos del rumbo de los contornos a lo largo de las trazas de las fallas principales.

El mallado final del tope de la arena C-4 y su respectiva interpolación, se observan en las figuras 21 y 22, muestran una superficie parcialmente erosionada en la zona del Pilar, sur del bloque I, sin embargo pudo ser seguida en el bloque XII. En dicha superficie se tienen los menores tiempos, cerca de los 1840 ms, que corresponden a menores profundidades en el noroeste, y los mayores tiempos, entre los 2440 ms y los 2472 ms, hacia el sureste. Como se dijo anteriormente, esta arena está erosionada en la zona del Pilar. De igual forma, el mapa estructural en tiempo muestra la tendencia del sistema de fallas Lama-Este y también muestra un sistema de fallas con rumbo NO-SE. Esto queda evidenciado con las variaciones en los tiempos que se observan en el sureste del área de interés. Este reflector sísmico fue interpretado como un pico de máxima amplitud positiva.

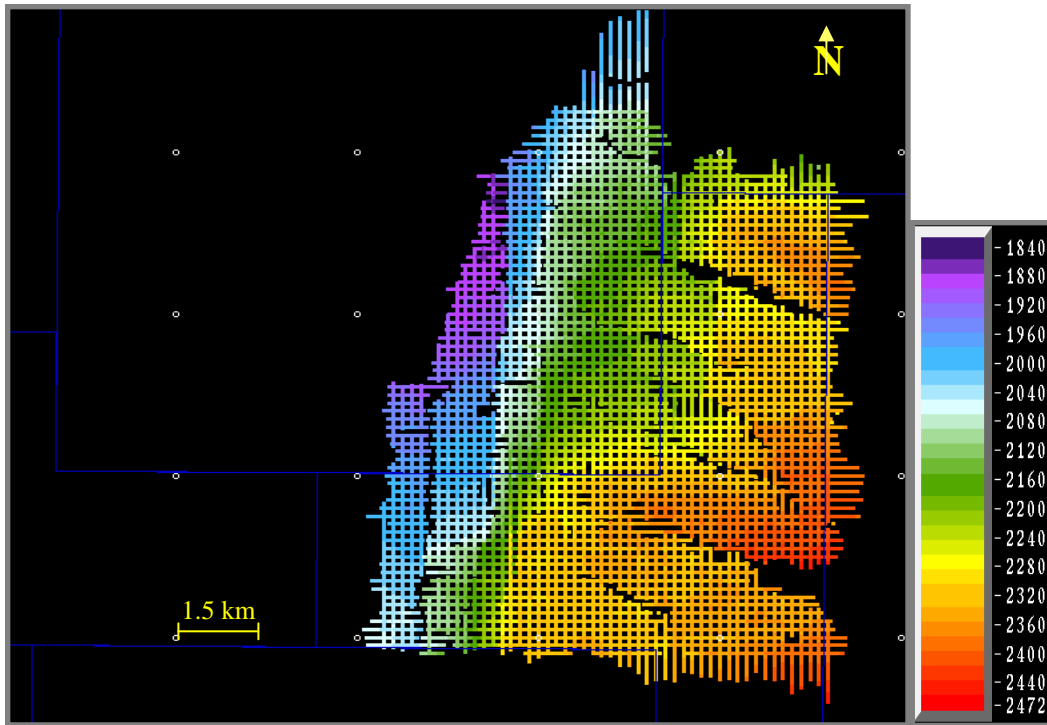


Figura 21. Malla interpretada del reflector correspondiente al tope de la arena C-4 (Formación Misoa)

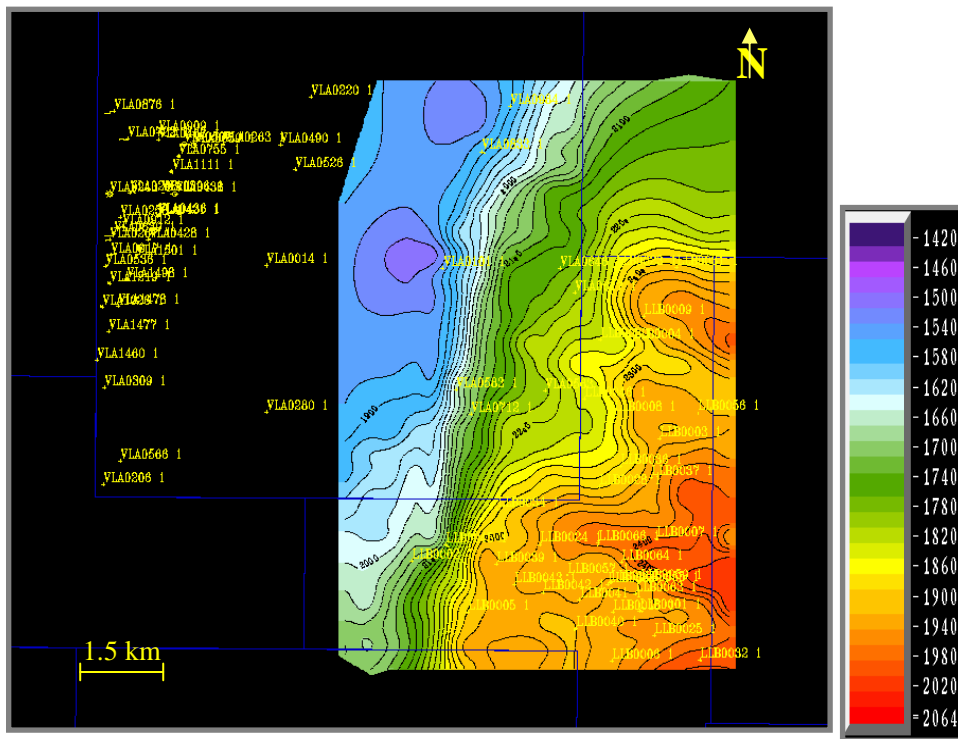


Figura 22. Mapa estructural en tiempo del reflector correspondiente al tope de la arena C-4

El tope de la arena C-5 fue interpretado como un mínimo en amplitud. Al igual que el tope de la arena C-4, esta unidad aparece erosionada pero parcialmente en la zona del Pilar. Los tiempos en el mapa estructural en tiempo (figura 24) varían entre los 1720 ms y los 2528 ms, el buzamiento de esta superficie es hacia el sureste. También se pueden visualizar los mismos rasgos estructurales que en el tope de la arena C-4.

En cuanto al tope de la arena C-6 el buzamiento es similar al resto de las arenas interpretadas, hacia el sureste. Los tiempos se encuentran entre los 1660 ms como el mínimo y los 2620 ms como el máximo. Los rasgos estructurales que presenta este horizonte son similares al resto de los horizontes interpretados (figura 26).

El tope de la Formación Guasare es la base en donde se depositaron todas las secuencias mencionadas anteriormente, por lo que estas tres unidades interpretadas y el tope de la Formación Guasare guardan cierto paralelismo. El mapa estructural en tiempo (figura 28) generado muestra una variación de un poco mayor a los 1000 ms (1840-2860 ms), lo cual refleja la complejidad geológica presente en la zona. Este reflector fue interpretado como un pico de máxima amplitud positiva y su expresión sísmica es muy clara y fácil de interpretar por el alto contraste de impedancia que existe. La causa de esto es que se encuentran en contacto las arenas de la Formación Misoa con una formación calcárea como lo es Guasare.

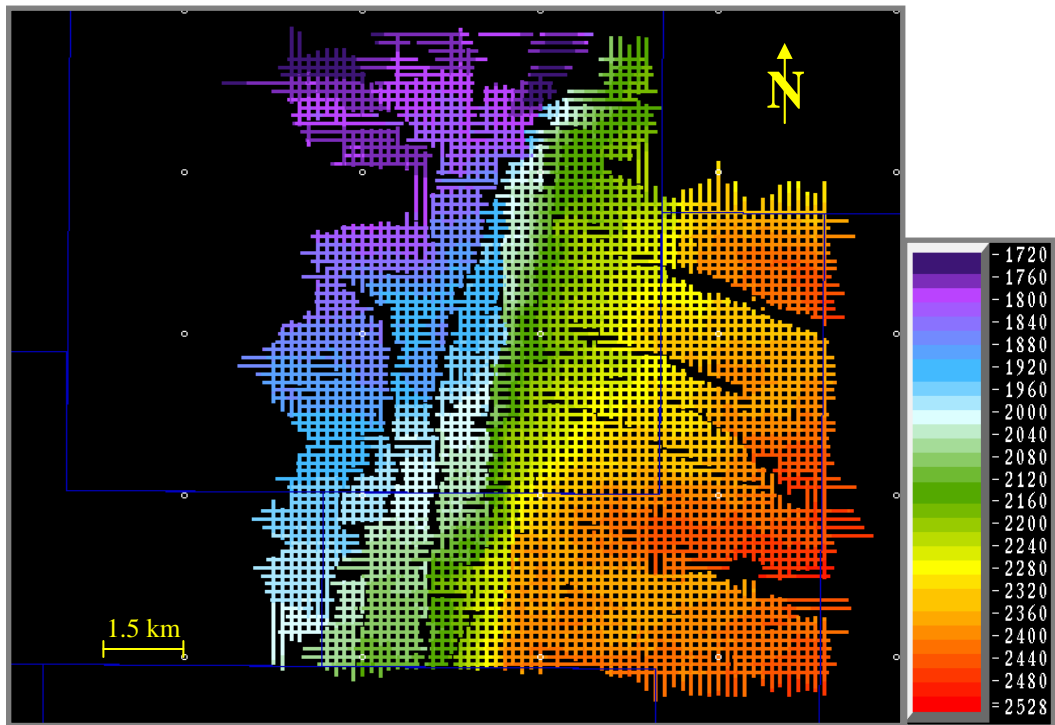


Figura 23. Malla interpretada del reflector correspondiente al tope de la arena C-5 (Formación Misoa)

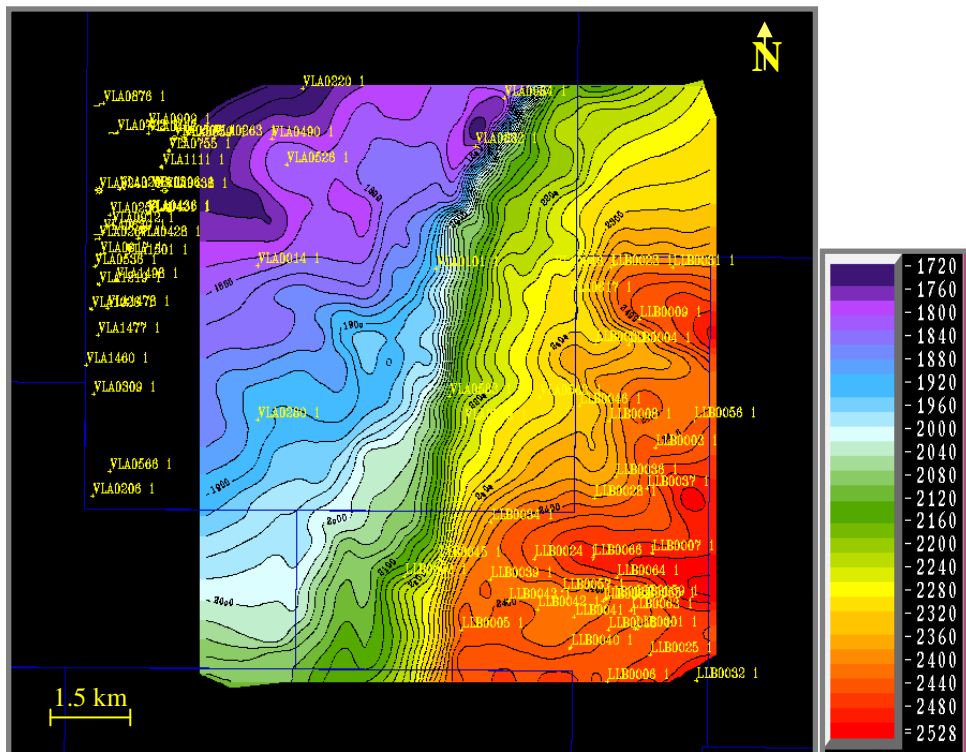


Figura 24. Mapa estructural en tiempo correspondiente al tope de la arena C-5 (Formación Misoa)



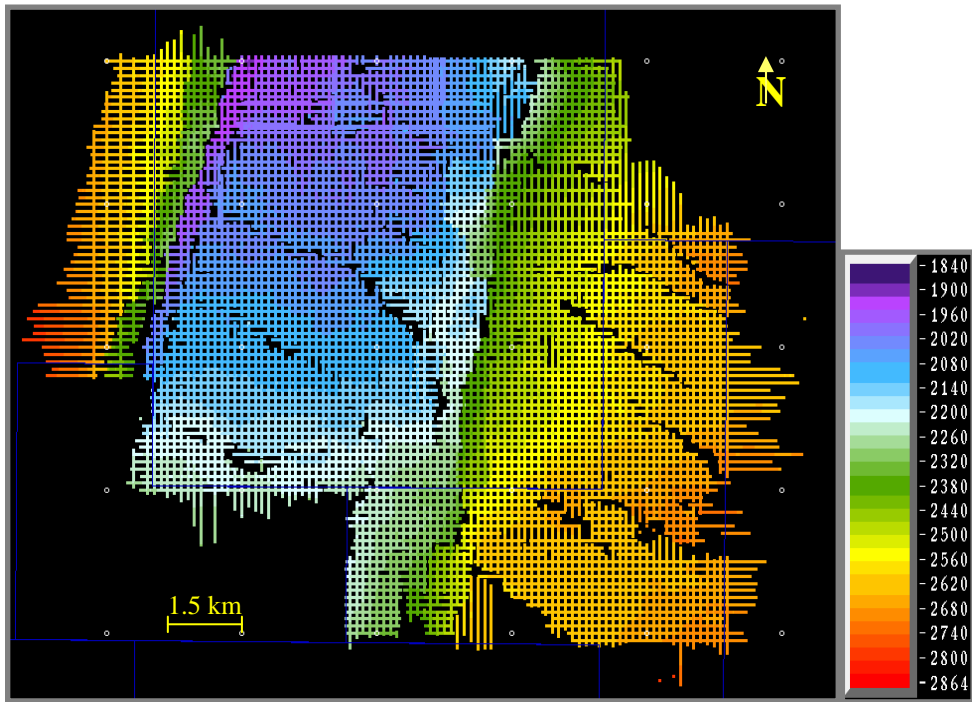


Figura 27. Malla interpretada del reflector correspondiente al tope de la Formación Guasare

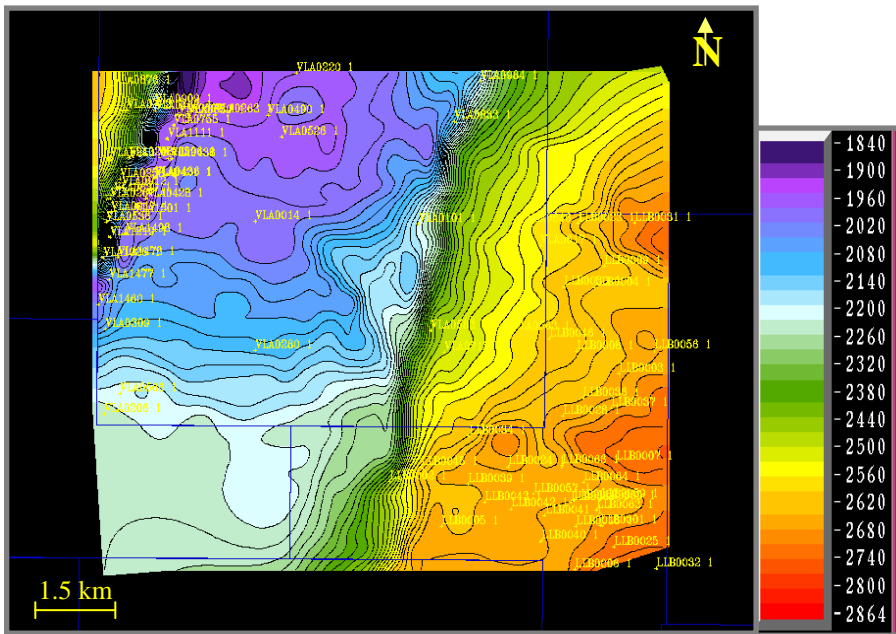


Figura 28. Mapa estructural en tiempo correspondiente al tope de la Formación Guasare apreciándose claramente los bloques estructurales delimitados por la traza de las fallas principales

### ***Atributos sísmicos estructurales.***

Para realizar un estudio de los sistemas de fallas menores es necesario hacer un análisis de un tipo de atributos sísmicos que ayudan a reconocer esas discontinuidades que algunas veces resultan un poco difíciles de interpretar. Estos atributos son calculados a partir de la configuración y continuidad del o de los reflectores interpretados, ellos están definidos como atributos estructurales. Como se dijo anteriormente, la extracción de estos atributos ayuda a revelar tendencias de fallas, alineaciones y de anomalías estructurales que no son fáciles de observar o no están bien definidas por los mapas estructurales en tiempo. Los mapas de dichos atributos son hechos basados en el “grid” interpretado, dentro de estos se pueden definir los siguientes:

#### ***Atributo sísmico de buzamiento (Dip):***

Un mapa de buzamiento muestra la magnitud del gradiente tiempo. Se construye comparando cada muestra del horizonte con dos muestras adyacentes en direcciones ortogonales. El algoritmo matemático utilizado para el cálculo de este tipo de mapa es el siguiente:

$$Dip = \sqrt{\left(\frac{dt}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dt}{dy}\right)^2}$$

donde  $\frac{dt}{dx}$  es el buzamiento en la dirección x y  $\frac{dt}{dy}$  es el buzamiento en la dirección de y. (Landmark, 2001)

#### ***Atributo sísmico de rumbo (azimuth):***

Este atributo muestra la dirección de la máxima pendiente. El mapa de rumbo se construye comparando cada muestra del horizonte con dos muestras adyacentes en direcciones ortogonales. Para la construcción del mapa se usa el siguiente algoritmo:

$$Azimuth = \arctg \left( \frac{\left( \frac{dt}{dy} \right)}{\left( \frac{dt}{dx} \right)} \right)$$

donde  $\frac{dt}{dx}$  es el buzamiento en la dirección x y  $\frac{dt}{dy}$  es el buzamiento en la dirección de y. (Landmark, 2001)

***Atributo sísmico de segunda derivada (edge):***

La segunda derivada enfatiza las discontinuidades en una imagen, detecta los cambios de buzamiento en un horizonte, usando un algoritmo distinto al usado para calcular mapas de buzamiento. La segunda derivada implica la comparación de puntos alrededor de una sola muestra puntual, en una imagen original. Existe una extensa variedad de algoritmos desarrollados para realizar esta comparación. Uno de estos es el que compara muestras en ambos lados de cada muestra puntual, llamado detección de bordes Sobel. Esta técnica se ilustra en el siguiente esquema:

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>

Tabla 3. Esquema de bordes de Sobel

En este esquema la muestra puntual está definida por la letra **E**, la diferencia entre las columnas es igual a X y las diferencias entre las filas es igual a Y. Las ecuaciones para calcular X e Y en la muestra puntual son las siguientes:

$$X = (C + 2F + I) - (A + 2D + G)$$

$$Y = (A + 2B + C) - (G + 2H + I)$$

$$Edge = X^2 + Y^2$$

El resultado de los cálculos de la segunda derivada es un plano que conecta los resultados de la matriz 3x3 en cada muestra del horizonte original. (Landmark, 2001)

***Extracción y análisis de atributos sísmicos estructurales.***

Para la extracción y el consecuente análisis de los atributos sísmicos estructurales se hizo uso de la herramienta *PostStack*®. Los atributos sísmicos extraídos fueron los de “*dip-azimuth*” y “*edge*”, y fueron seleccionados los topes de las arenas C-5 y C-6 y de la Formación Guasare por tener un mayor interés geológico en la zona ya que con ellos se puede representar la configuración geológica del área

Habiendo interpretado e interpolado cada uno de los horizontes, se procedió a extraer los atributos. En la figura 29 y 30 se observan el atributo “*dip-azimuth*” y “*edge*” para el tope de la Formación Guasare, respectivamente. En dichas figuras se visualizan los principales alineamientos correspondientes a los sistemas de fallas Lama Icotea y Lama Este. Por otra parte, también se logran ver los alineamientos perpendiculares a los dos sistemas nombrados anteriormente.

Al igual que para el tope de la Formación Guasare, las figuras 31, 32, 33 y 34 muestran los mapas de “*dip-azimuth*” y “*edge*” para los topes de la arena C-5 y C-6 respectivamente. En ellas se pueden ver las mismas tendencias en cuanto a las discontinuidades presentes, por una parte se destacan los grandes sistemas de fallas Icotea y del Este, y por otra parte las fallas perpendiculares a estas grandes fallas.

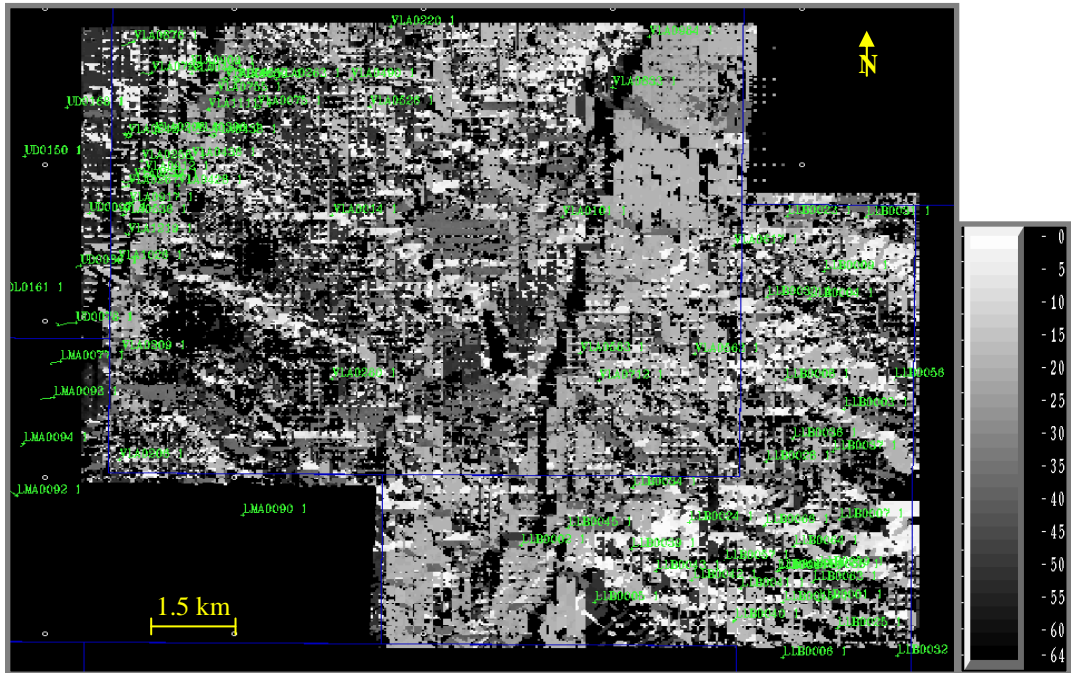


Figura 29. Mapa de “*dip-azimuth*” extraído al tope de la Formación Guasare. Se observan los alineamientos de Lama-Icotea al oeste y Lama-Este al este de la zona de estudio, así como también los sistemas de fallas perpendiculares a los sistemas principales.

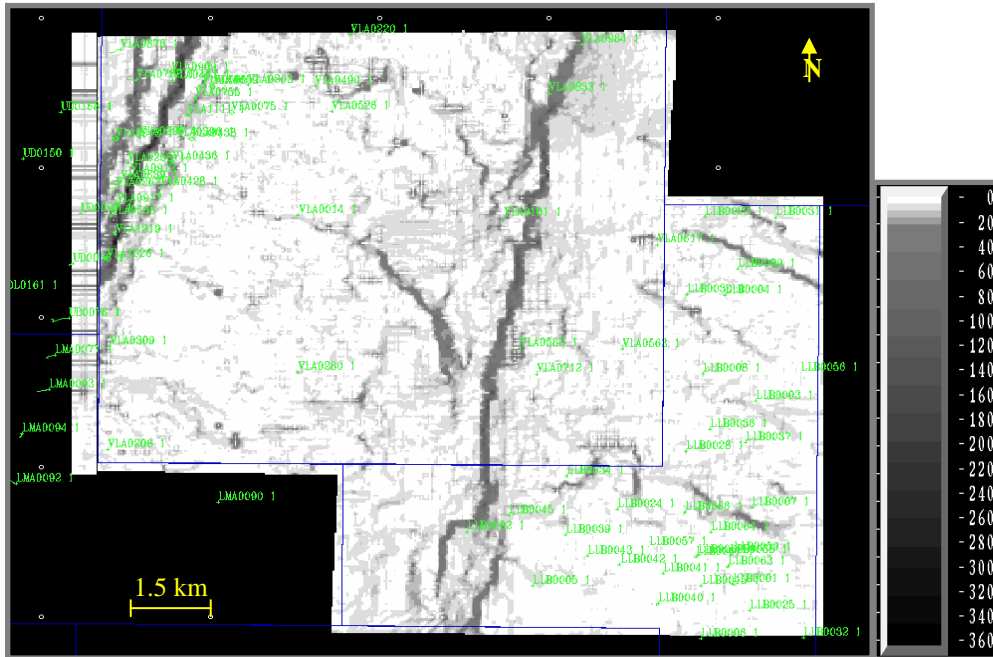


Figura 30. Mapa de “*edge*” extraído del tope de la Formación Guasare en toda el área de estudio.

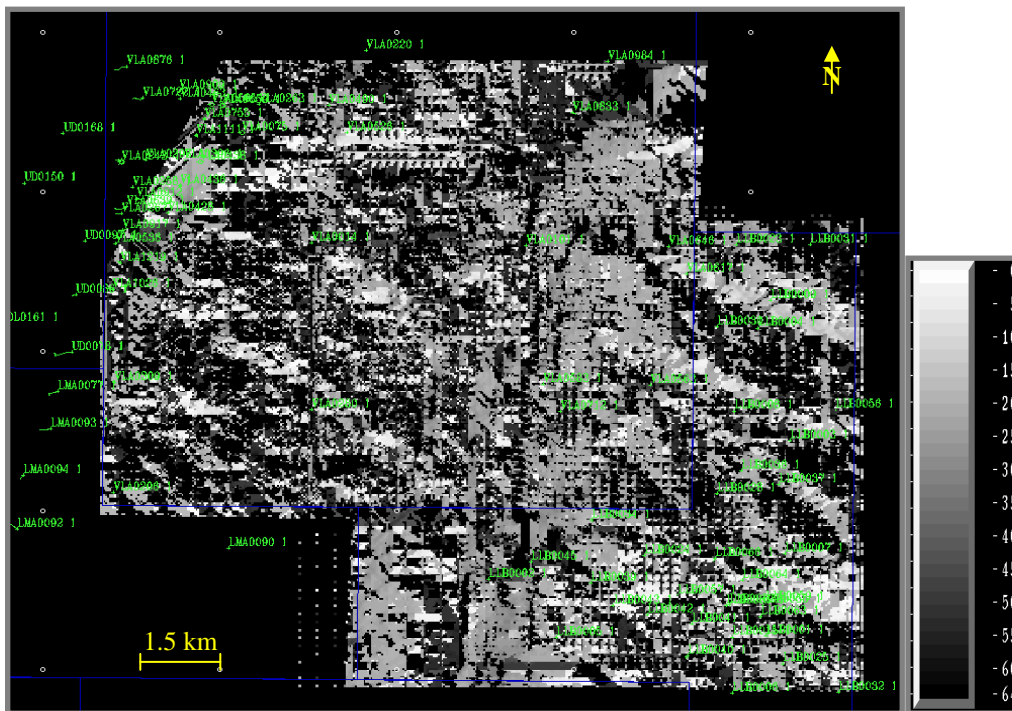


Figura 31. Mapa de “*dip-azimuth*” extraído al tope de la arena C-6. Al igual que en el tope de Guasare se observan los alineamientos de Lama-Icotea al oeste y Lama-Este al este de la zona de estudio, así como los sistemas de fallas perpendiculares a los sistemas principales

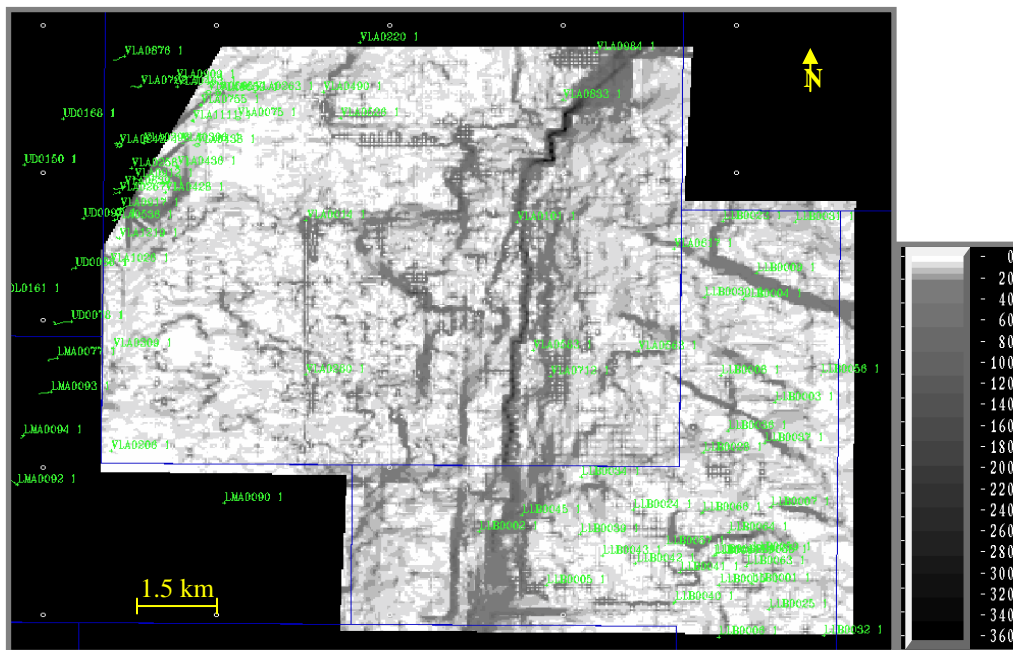


Figura 32. Mapa de “*edge*” extraído de la arena C-6 en el área de estudio.

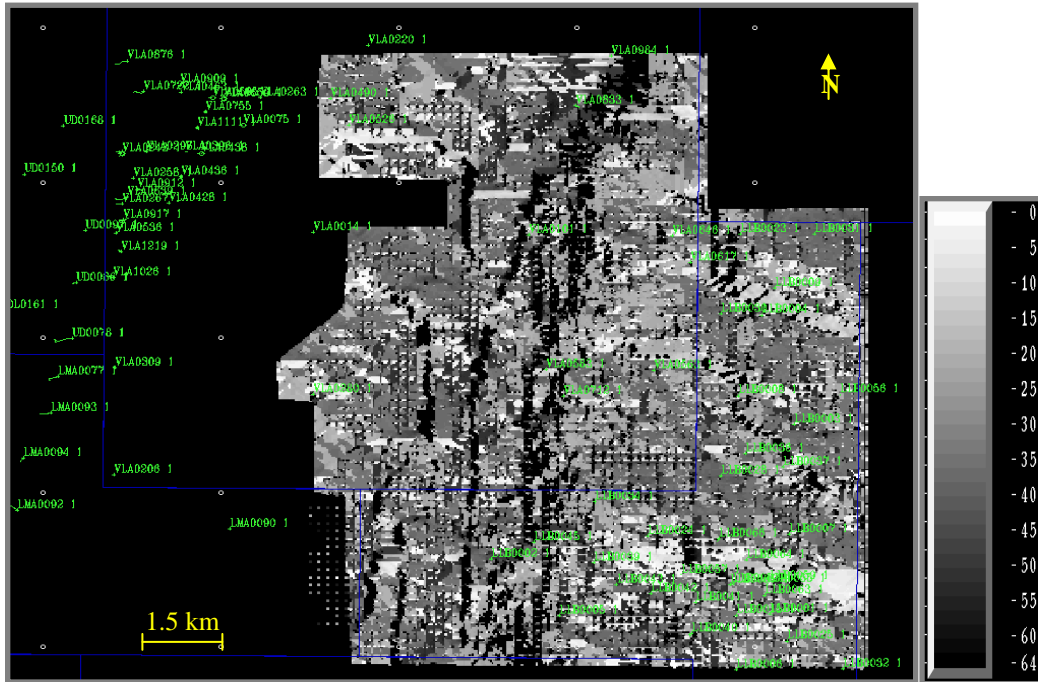


Figura 33. Mapa de "Dip azimuth" del tope de la arena C-5. Se puede observar claramente el efecto de la erosión del Eoceno en la zona del Pilar.

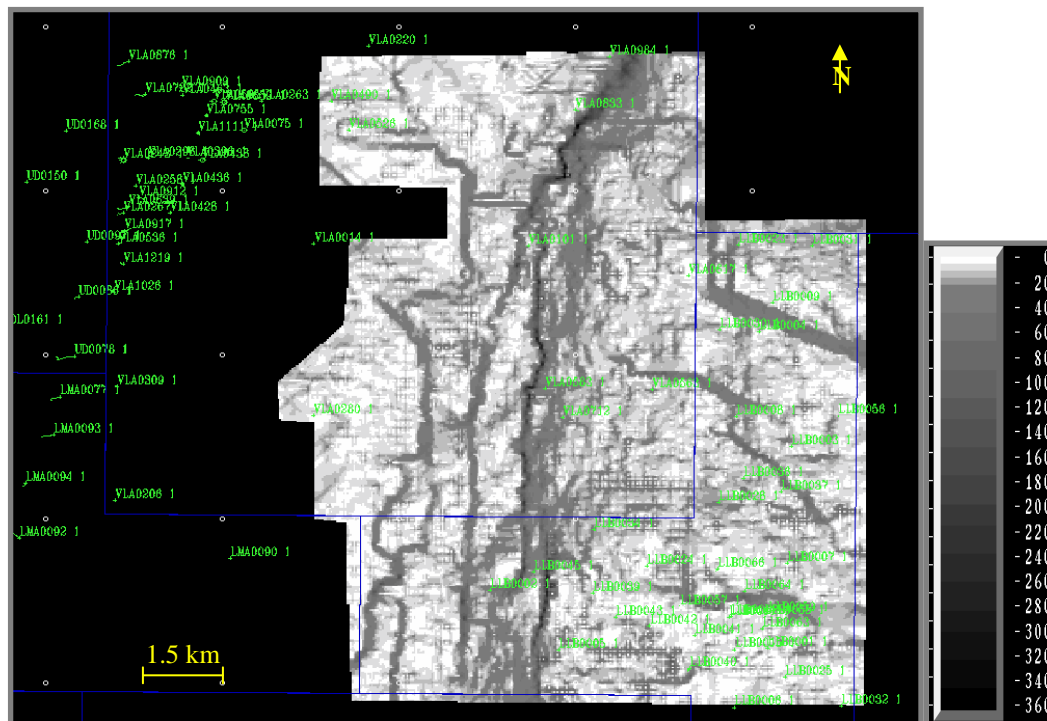


Figura 34. Mapa de "edge" extraído al tope de la arena C-5. En el se puede apreciar los alineamientos de los sistemas de fallas presentes en el área

### *Análisis de la interpretación sísmico-estructural.*

En la figura 35 se observa una línea sísmica con orientación E-W en la cual se integra la interpretación de los sistemas de fallas Lama-Icotea y Lama-Este, así como también los horizontes de interés. Esta figura afirma lo que se ha venido analizando con relación a la erosión parcial que presenta cada reflector. Cabe destacar que para efectos de un mejor control estructural se interpretó el tope de la Formación Socuy de edad Cretácica, por ser este un buen marcador sísmico regional. Las figuras 36 y 37 corresponden a dos líneas sísmicas perpendiculares a las fallas normales que se encuentran presentes en la zona. En ellas puede ser observada la integración de la interpretación de las fallas y de todos los horizontes interpretados. Se puede confirmar lo observado en los mapas estructurales en tiempo para cada uno de los horizontes interpretados, lo cual es el buzamiento de los mismos en sentido sureste, y por otra parte el buzamiento de las fallas normales hacia el noreste.

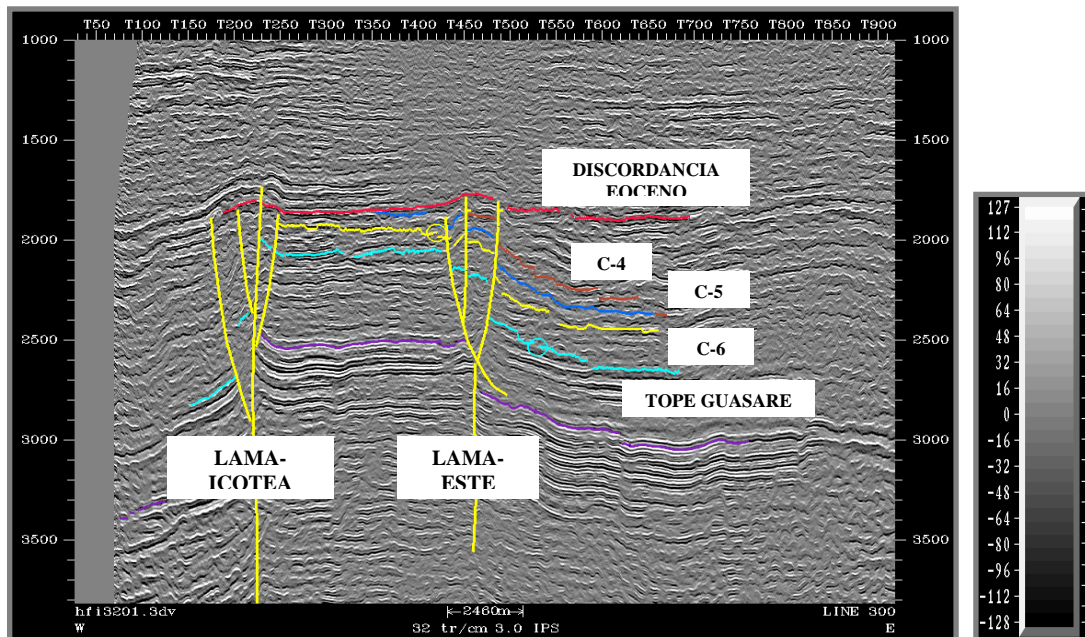


Figura 35. Línea sísmica con sentido E-W en la cual se integra la interpretación de las fallas Lama-Este y Lama-Icotea, con los respectivos horizontes interpretados.

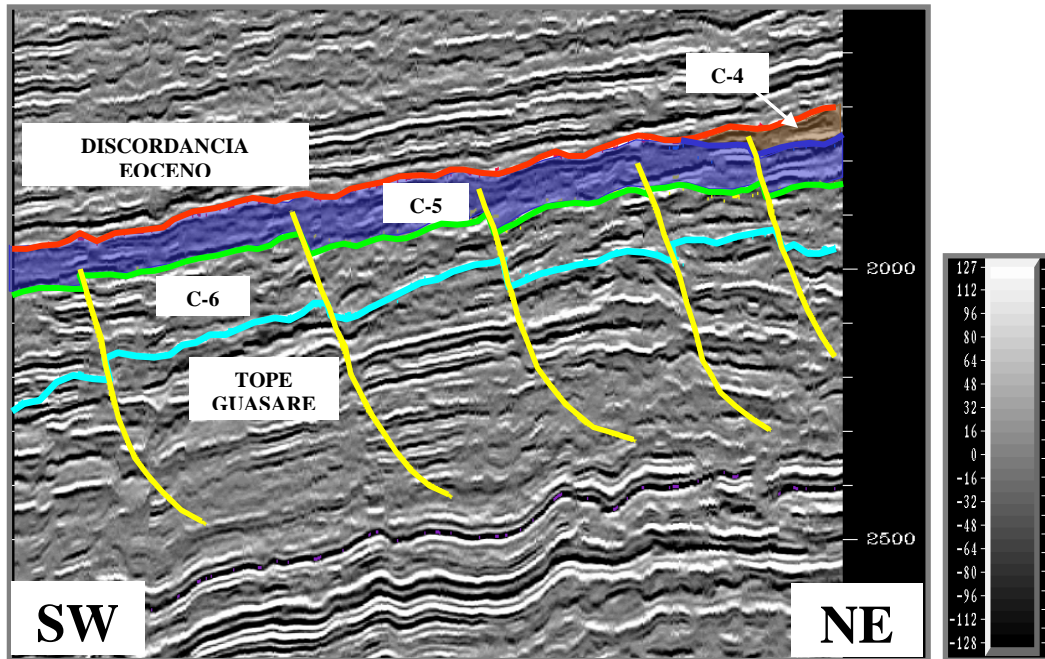


Figura 36. Línea sísmica con orientación SW-NE tomada en el bloque I en donde se muestran los topes estudiados y el sistema de fallas normales con buzamiento noreste.

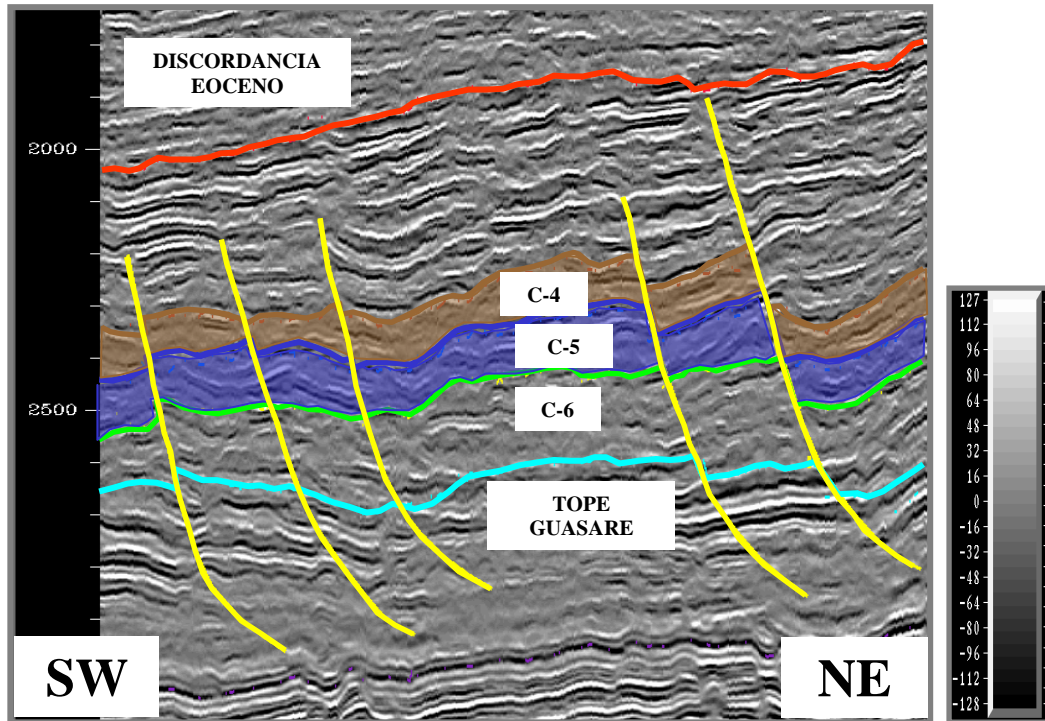


Figura 37. Línea sísmica con orientación SW-NE tomada en el bloque XII, en donde se puede observar la configuración estructural de la zona.

Una de las técnicas para lograr interpretar las fallas presentes en una zona es haciendo el uso de los “*time slices*” (cortes horizontales al cubo sísmico). Estas vistas ayudan a determinar o al menos estimar el buzamiento de las fallas para luego hacer una interpretación mucho más adaptada a la realidad. Las figuras 38 y 39 muestran dos “*time slices*” hechos al cubo sísmico de HFI en los cuales se pueden apreciar las discontinuidades del dato sísmico, estas discontinuidades están asociadas a fallas. Las marcas rojas corresponden a las fallas Lama-Icotea (parte más occidental del área) y Lama-Este (parte más oriental del área)

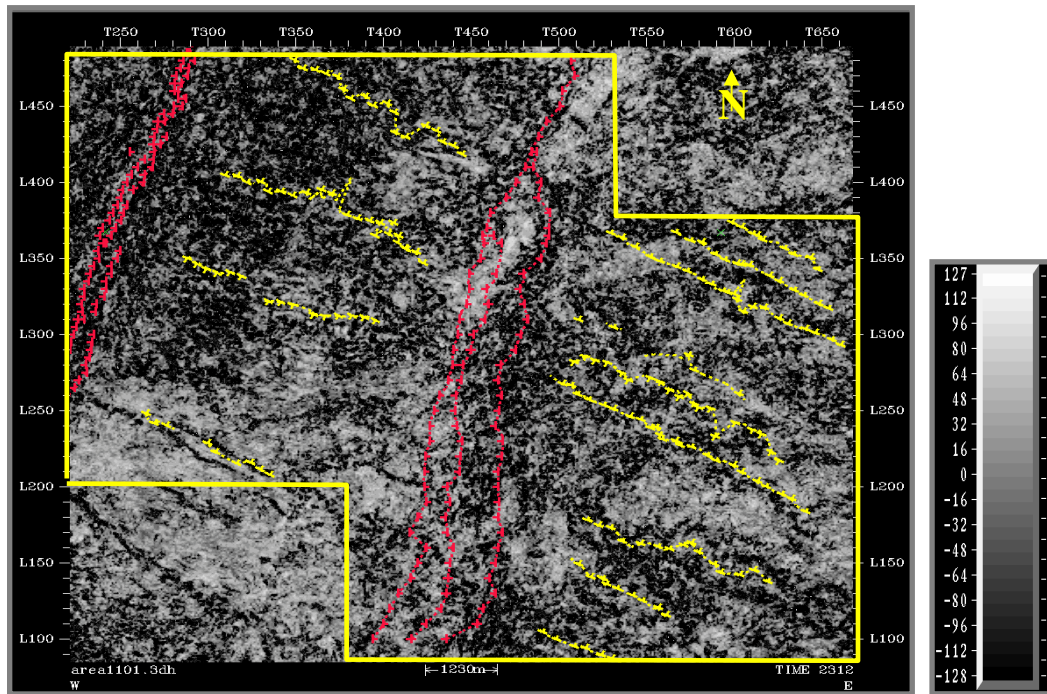


Figura 38. Sección sísmica horizontal en tiempo (2312 ms) en donde se muestran las tendencias de los sistemas de fallas interpretados. En el recuadro se muestra el área de estudio.

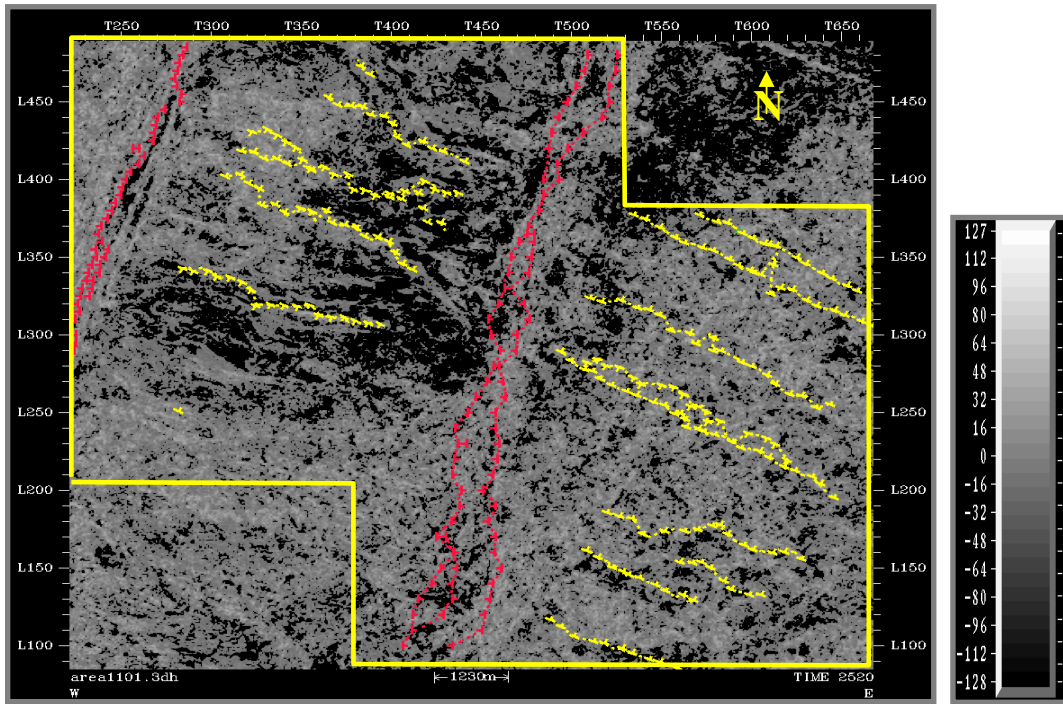


Figura 39. Sección sísmica horizontal en tiempo a 2530 ms del cubo sísmico de HFI. Nótese los alineamientos principales correspondientes a las fallas Lama-Icotea y Lama-Este (color rojo) y las fallas perpendiculares a estas (color amarillo).

## **CAPITULO IV**

### **ATRIBUTOS SÍSMICOS DE LA TRAZA COMPLEJA**

#### *Consideraciones teóricas*

Un atributo es una propiedad específica de información acerca de algo. Es cualquier detalle que sirve para calificar, identificar, clasificar, cuantificar, o expresar el estado de una cantidad.

En geofísica, los atributos sísmicos, según Chen y Sidney (1997<sup>a</sup>), son medidas de las características geométricas, cinemáticas, dinámicas y estáticas de la información total contenida en los datos sísmicos. Estas medidas están usualmente basadas en estimaciones de amplitud, fase y frecuencia.

Los atributos son de gran utilidad ya que se correlacionan con algunas propiedades físicas de interés, bien sea de manera cuantitativa o cualitativa (Hart, 2002). El objetivo de un estudio cuantitativo es hacer predicciones numéricas de las propiedades del subsuelo de interés a través de la sísmica. En un análisis cualitativo, la finalidad es encontrar estructuras que comparten características similares; este estudio provee información de la geometría y de la distribución de las propiedades físicas de los estratos, tales como porosidad, litología, espesor de capa, etc.

Con estas dos características, se puede extraer la mayor información de los datos sísmicos y utilizarlos para interpretar características estructurales, stratigráficas y litológicas del subsuelo. Por ello, es de suma importancia una calibración con registros de pozos e información del yacimiento para así justificar cualquier correlación entre atributos y parámetros petrofísicos.

Los atributos sísmicos pueden ser generados a partir de distintos objetos de la sísmica: una sección sísmica, un evento sísmico y un volumen o cubo sísmico, (Chen y Sidney, 1997<sup>a</sup>):

- Atributos basados en una sección sísmica: usualmente son los atributos generados y visualizados en conjunto con la traza sísmica en forma de ondícula.
- Atributos basados en eventos sísmicos: también llamados atributos de superficie o atributos instantáneos, proveen información de los datos sísmicos a lo largo de una superficie, en particular, un horizonte interpretado. Siguiendo un horizonte, se puede estudiar la variación de los atributos en o entre los límites geológicos. La extracción se puede realizar de un evento instantáneo, en donde los atributos son derivados del análisis de la traza sísmica en la localización del evento, o de una ventana de traza sísmica, en la que los atributos son extraídos de ventanas variantes (puede cambiar de longitud y posición en la traza sísmica mientras nos movemos de traza en traza). El límite superior e inferior de esta ventana varía según el evento sísmico interpretado. Como caso especial, se tiene una sección horizontal (“time slice”).
- Atributos basados en volumen (cubo sísmico): los atributos son derivados de un volumen sísmico 3D. Tiene mucho valor y aplicabilidad ya que visualiza la correlación entre trazas, y provee información de la similitud y continuidad de la señal sísmica entre traza y traza. Un atributo de volumen es definido como la suma de un atributo instantáneo sobre un intervalo, que puede estar limitado por dos horizontes interpretados, o por una ventana constante alrededor de la interpretación, (Sonneland, 1989).

Para realizar una buena selección de los atributos a usar en función del objetivo, por lo general se realiza un análisis de gráficos cruzados (“cross plot”), ya que permite determinar la correlación existente entre una propiedad física en particular y un atributo sísmico, y así discriminar aquellos que presentan poca relación.

### Atributos de la traza compleja

Los atributos de la traza compleja son medidas basadas en el análisis de la traza sísmica analítica.

Una traza sísmica (la traza que es detectada y registrada en la práctica) puede ser representada a partir de una señal analítica, con componentes real e imaginaria, (figura 40) Sólo la componente real es detectada y visualizada, (Taner et al, 1979).

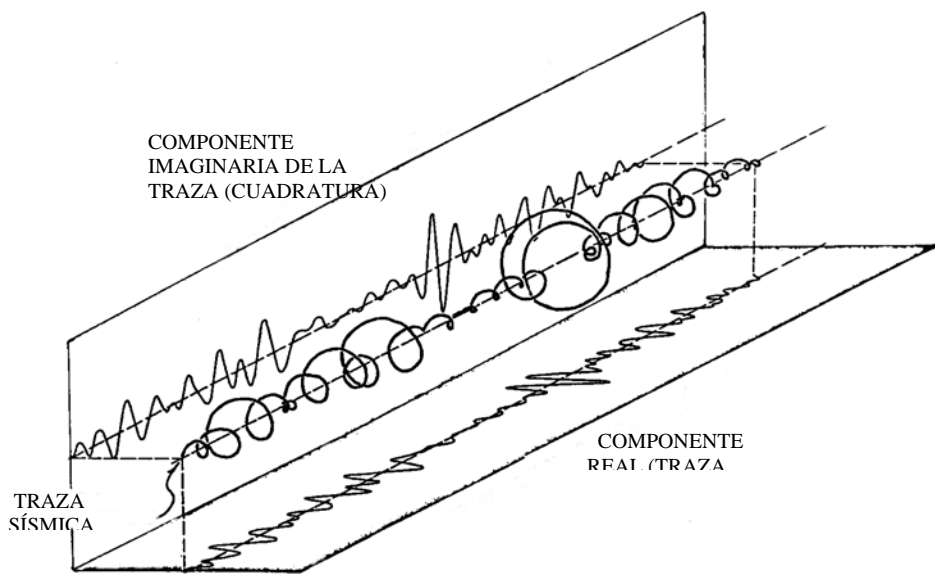


Figura 40. Traza sísmica analítica. Esta traza es generada por un vector cuya longitud varía en el tiempo, rotando en función del tiempo

La traza sísmica  $f(t)$  es entonces, la componente real de una señal compleja:

$$F(t) = f(t) + ih(t)$$

$$i = \sqrt{(-1)}$$

donde:

$F(t)$ : variable compleja en función del tiempo

$f(t)$ : componente real (traza sísmica grabada o registrada)

$h(t)$ : componente imaginaria de la traza (cuadratura); en la práctica,  $h(t)$  está en desfase con  $f(t)$   $90^\circ$ . Se determina a partir de  $f(t)$  usando la transformada de Hilbert:

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\tau)}{\tau - t} d\tau$$

Conociendo  $f(t)$  y  $h(t)$  se puede definir  $A(t)$  y  $\theta(t)$ :

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + h^2(t)} = |F(t)|$$

$$\theta(t) = \tan^{-1}[h(t) / f(t)]$$

$A(t)$  se conoce como **amplitud instantánea** y  $\theta(t)$  como **fase instantánea**.

### *Amplitud instantánea*

La amplitud instantánea, también conocido como intensidad de reflexión, es la amplitud independiente de la fase. Es una función del tiempo que puede tener su máximo valor en puntos de la fase que no pertenecen a un pico o valle de la traza real, especialmente si el evento está compuesto por varias reflexiones. Por ello, la máxima intensidad de reflexión asociada con un evento reflector puede ser diferente de la máxima amplitud del pico o valle de la traza real, (Taner, 1979).

La amplitud instantánea es la envolvente de la traza sísmica. Para un instante de tiempo, la amplitud instantánea es calculada como la raíz cuadrada de la energía total de la señal sísmica:

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + h^2(t)}$$

por lo tanto, la amplitud instantánea es siempre positiva y en el mismo orden de magnitud de la traza real.

### ***Fase instantánea***

La fase instantánea es definida como la fase de la traza compleja; describe el ángulo entre la traza y su transformada de Hilbert para un tiempo dado:

$$\theta(t) = \tan^{-1} [h(t) / f(t)]$$

La fase instantánea es una medida de la continuidad de eventos en una sección sísmica, ya que es independiente de la amplitud instantánea. Su valor es siempre un número entre  $-180^\circ$  y  $+180^\circ$ . La tasa temporal de cambio de la fase instantánea es la frecuencia instantánea.

### ***Frecuencia instantánea***

La frecuencia instantánea, al igual que la fase, es un valor asociado a un instante de tiempo. Representa la tasa de cambio de la fase instantánea como una función del tiempo. Es una medida de la pendiente de la fase de la traza y es obtenida tomando la derivada de la fase:

$$w(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$$

La mayoría de los eventos están compuestos de reflexiones individuales de varios reflectores cercanos entre sí, con contraste de impedancia acústica y separación constantes. La superposición de reflexiones individuales puede producir un patrón de frecuencia que caracterizan al evento completo. La frecuencia de un evento

compuesto por un número de reflexiones cambiará gradualmente a medida que la secuencia de capas cambia en grosor o litología, por ejemplo; es por eso que la frecuencia es una herramienta útil.

### ***Polaridad aparente***

La polaridad aparente es definida como la señal de la traza real donde la amplitud instantánea de la traza tiene un máximo local. Este cálculo supone una ondícula de fase cero y asigna un signo positivo cuando el coeficiente de reflexión es positivo o un signo negativo cuando el coeficiente de reflexión es negativo. La aplicación de la polaridad aparente está relacionada principalmente con la identificación de acumulaciones de gas y cambios estratigráficos.

Los atributos explicados hasta ahora son los más usados en los proyectos de caracterización de yacimientos. Estos atributos principales conforman los elementos fundamentales para la generación de la inmensa diversidad de atributos sísmicos existentes en las diferentes plataformas de ambiente integrado.

En general, la respuesta de cada uno de los atributos sísmicos está asociada a los cambios en la litología y en las propiedades físicas del subsuelo. Con el análisis en conjunto de estos atributos se pueden distinguir zonas en la sísmica con características sísmicas particulares que pueden relacionarse a rasgos geológicos.

### ***Extracción y análisis de los atributos de la traza compleja.***

Las figuras que se muestran a continuación, son los resultados de la extracción de los atributos sísmicos instantáneos. Los atributos analizados fueron los siguientes: amplitud instantánea o intensidad de reflexión, frecuencia instantánea promedio, fase instantánea, amplitudes RMS, amplitud total y energía total. Como se explico

anteriormente, estos tipos de atributos ayudan a reconocer cambios estratigráficos, continuidad de reflectores.

La figura 41 representa el atributo de amplitud instantánea o intensidad de reflexión. Para los reflectores del intraeoceno se puede observar la escasa continuidad de los reflectores sísmicos, por el contrario en la parte inferior de la sección sísmica se observa una buena continuidad en los reflectores (edad Cretácico) La siguiente figura (42) muestra el mismo atributo pero esta vez con toda la interpretación cargada, a pesar del análisis mencionado antes se pudo hacer un seguimiento de los reflectores de interés con la ayuda de los pozos del área.

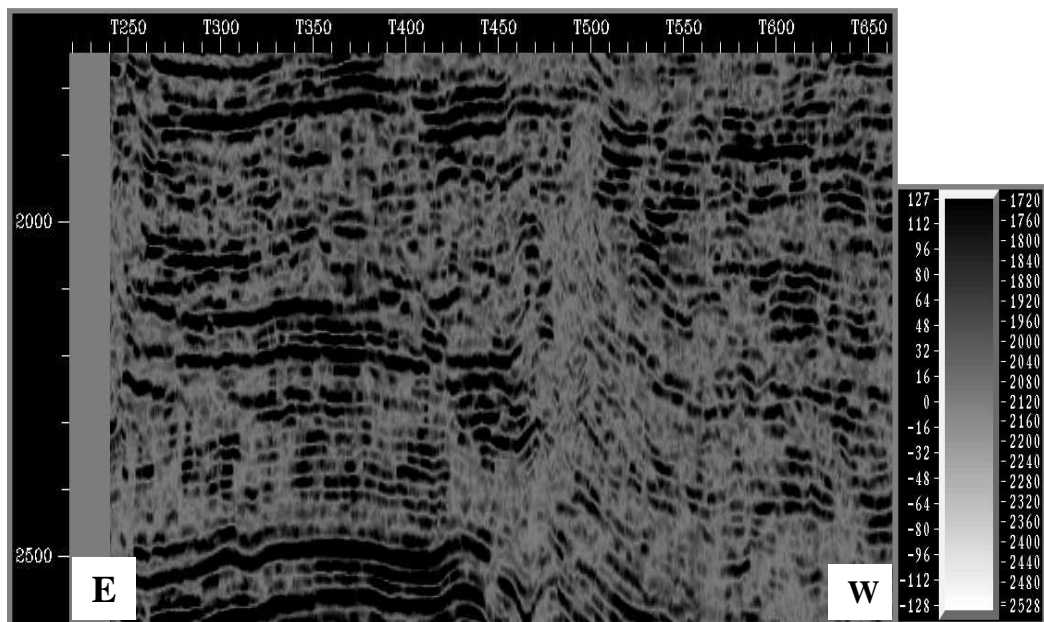


Figura 41. Línea sísmica con sentido E-W, en donde se puede apreciar el atributo sísmico amplitud instantánea.

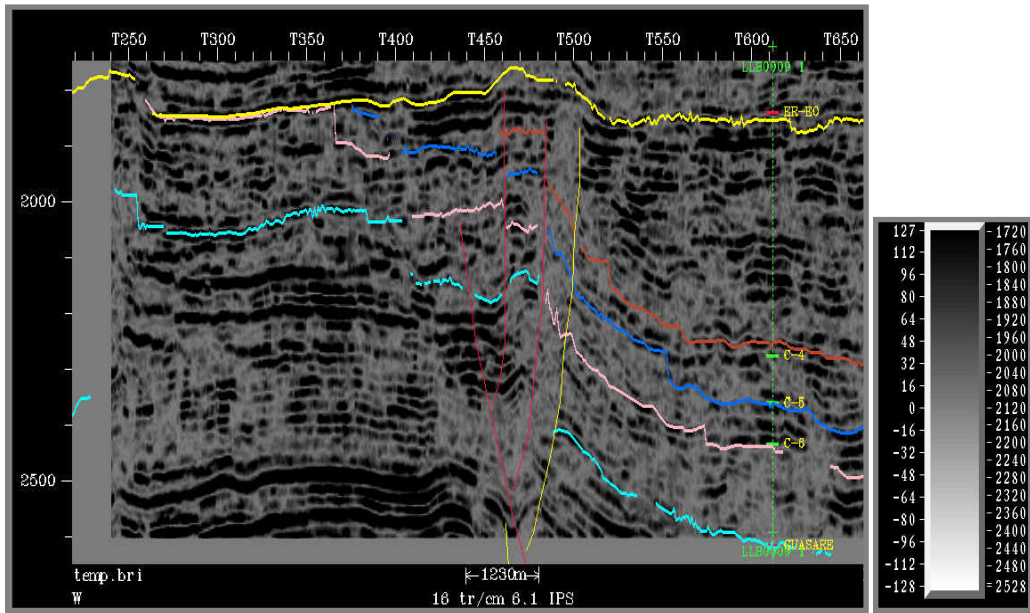


Figura 42. En esta figura se muestra la misma línea sísmica anterior pero con la interpretación cargada. Obsérvese el buen amarre de la sísmica con la información de pozo. (LLB0009)

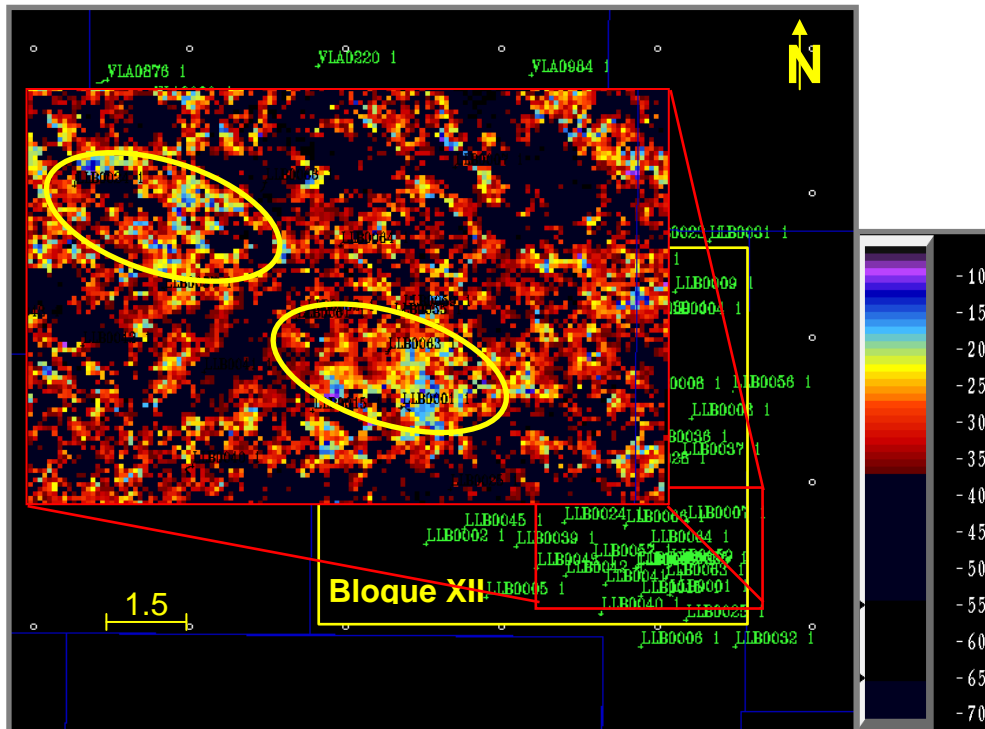


Figura 43. Mapa de frecuencia instantánea promedio extraído en el intervalo C-5+44 ms por debajo de ella, de la Formación Misoa.

En la figura 43 se muestra el mapa resultante de la extracción del atributo de frecuencia instantánea promedio en una ventana de tiempo tomando como referencia el tope de la unidad C-5 de la Formación Misoa y 44 milisegundos por debajo de ella. En éste se puede observar que los valores de baja frecuencia, entre 15 y 25 Hz, están asociados a las zonas productoras (zonas encerradas en círculos), esto pudiera dar una buena referencia en aquellas zonas en donde no se han perforado ningún pozo.

También se pueden visualizar los alineamientos correspondientes a las discontinuidades presentes en la zona, dichas discontinuidades están caracterizadas por tener valores de frecuencias altas entre los 35 y 50 Hz.

En las figuras 44, 45, 46 y 47 se observan los atributos estudiados en el área sobre el intervalo C-5+44ms. Todos estos atributos muestran una tendencia en el comportamiento del dato sísmico.

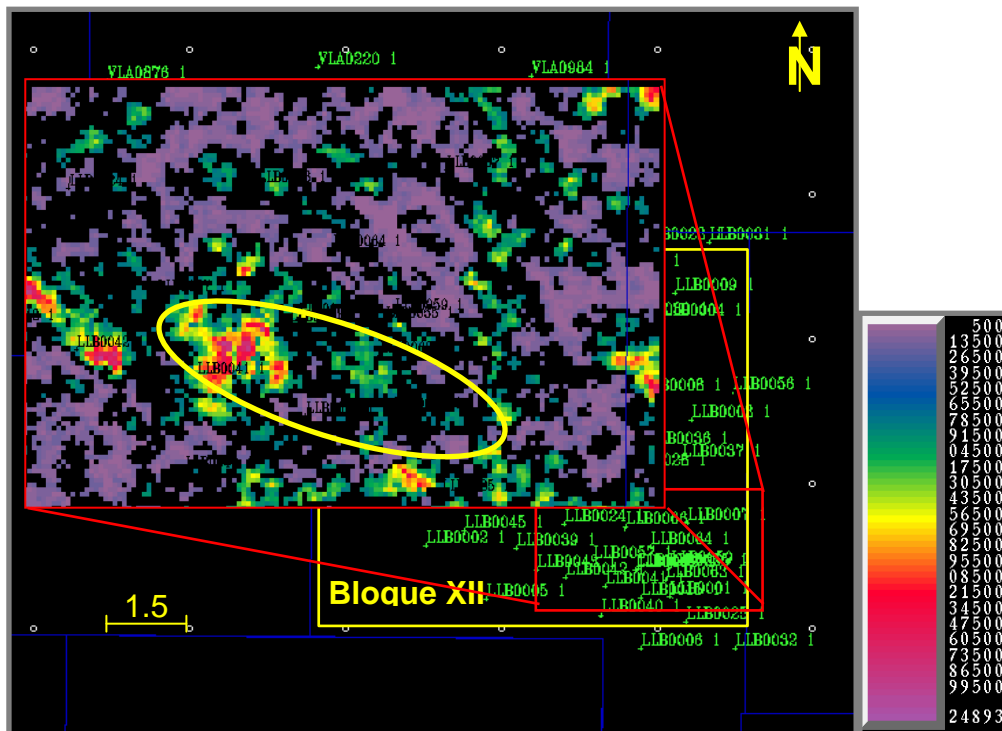


Figura 44 Mapa de energía total extraído en el intervalo C-5+44ms en el área del LLB0066

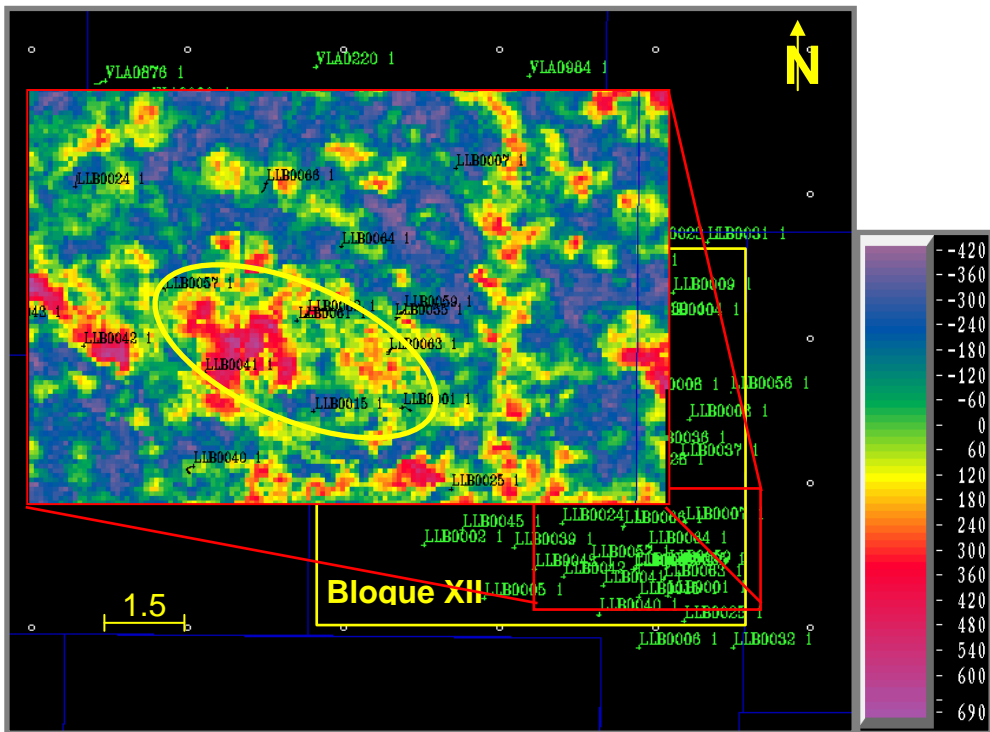


Figura 45 Mapa de amplitudes RMS extraído en el intervalo C-5+44ms en el área del LLB0066

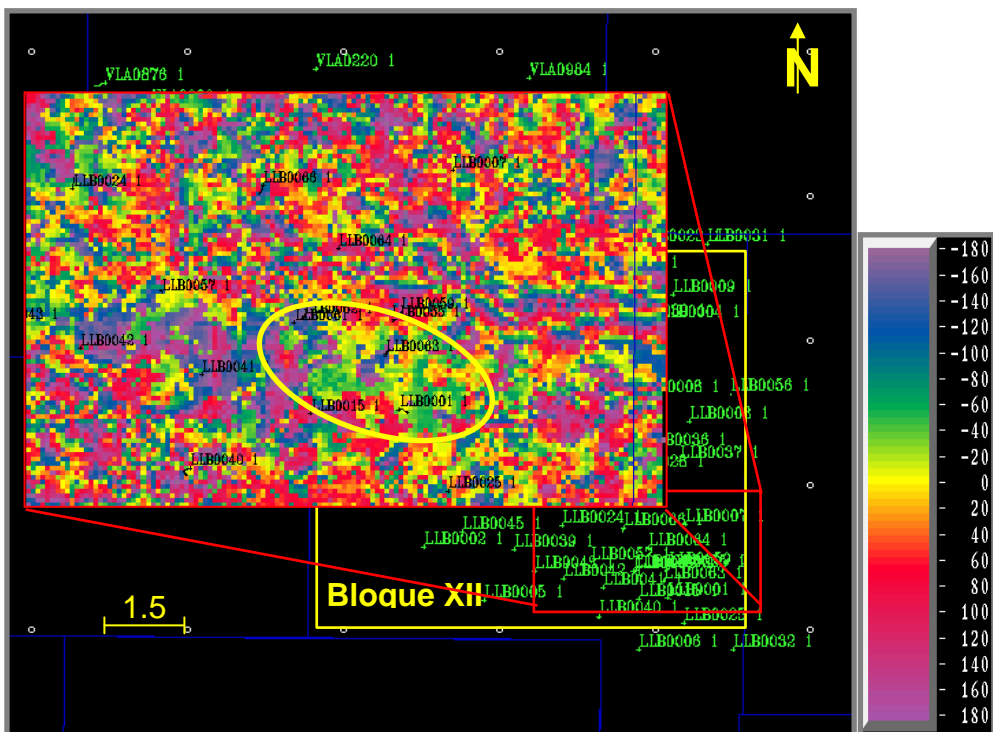


Figura 46 Mapa de fase instantánea extraído en el intervalo C-5+44ms en el área del LLB0066

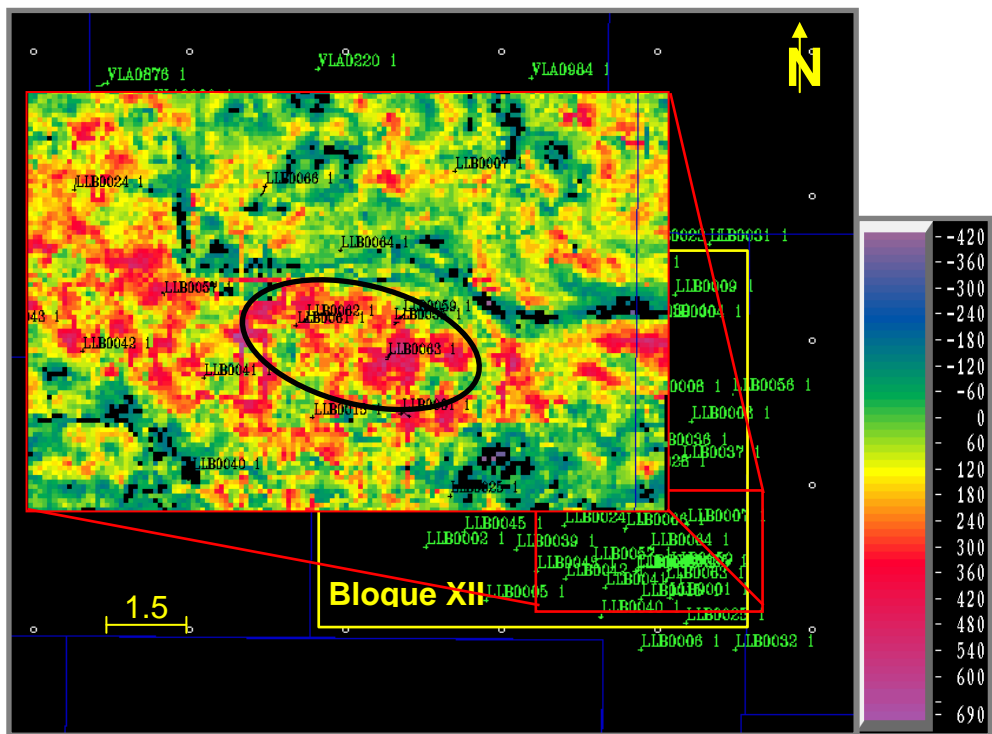


Figura 47 Mapa de amplitud total extraído en el intervalo C-5+44ms en el área del LLB0066

## CAPITULO V

### CONVERSIÓN TIEMPO-PROFUNDIDAD

La conversión de tiempo a profundidad es uno de los pasos más importantes en el desarrollo de todo estudio relacionado con una interpretación sísmica. La razón de esto es para evitar distorsiones en las estructuras presentes en la zona causadas por variaciones de velocidades.

En un primer paso es necesario generar un modelo de velocidades de toda el área. Para la generación de dicho modelo se usó la aplicación *DepthTeam*® de Landmark. Dicha aplicación requiere que le sean cargadas las curvas TZ o “check shots” de los pozos que hayan penetrado las unidades sedimentarias de interés, así como también los topes geológicos que se usaron para la interpretación y por ultimo los horizontes interpretados en tiempo. A partir de esto, el programa genera un modelo de velocidades ajustándose a los datos de entrada, dándole un mayor peso a las TZ y a los topes geológicos cargados (Landmark, 2001).

A continuación se presenta de manera resumida la metodología que usa la aplicación para generar el modelo:

1. En una primera instancia calcula las velocidades interválicas para cada horizonte sísmico cargado usando el valor del tiempo doble de viaje y las tablas TZ activas para los pozos cargados.
2. Genera un primer mapa de velocidades sobre toda el área. La calidad de este modelo dependerá de la cantidad de pozos, la variabilidad de las velocidades en la zona, tanto lateral como vertical, y la calidad del dato en los pozos.
3. Interpola los valores de velocidades obtenidos en los pozos a lo largo de toda el área tanto areal como en profundidad. Para llevar un control del error que se pudiera estar cometiendo, la aplicación genera un reporte en

donde muestra las diferencias que existe entre los topes geológicos y la superficie interpretada usada.

4. Y por ultimo, si los errores son permisibles se generará el modelo de velocidades final que servirá para realizar la conversión a profundidad.

En la figura 48 se muestra el modelo de velocidades obtenido a partir de la Discordancia del Eoceno y del tope de la Formación Guasare. En el se pueden observar el incremento de los valores de la velocidad con la profundidad, sin embargo en ciertas zonas existe un fenómeno conocido como inversión de velocidad. Las causas de esto pudieran ser un cambio de litología, un mayor grado de compactación en los paquetes sedimentarios, entre otras causas.

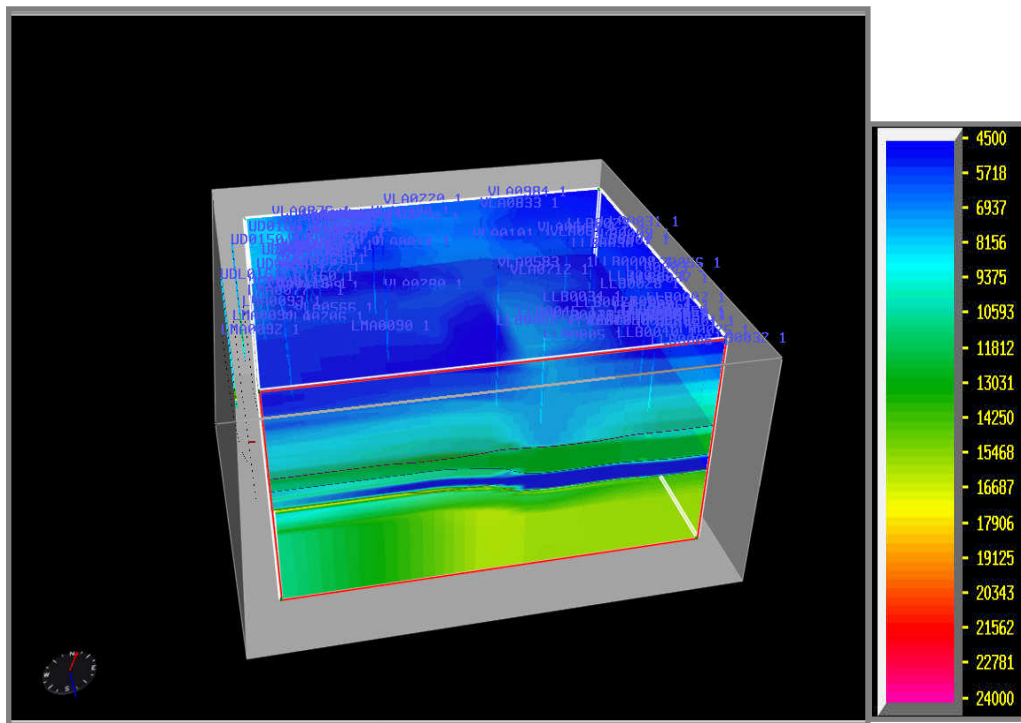


Figura 48. Modelo de velocidad generado a partir del uso de la Discordancia del Eoceno, el tope de la Formación Guasare y los pozos del estudio, con la aplicación *DepthTeam*®



correspondientes a los sistemas de fallas Lama-Icotea y Lama-Este, de igual forma se visualizan los sistemas de fallas normales con tendencia perpendicular a las fallas nombradas anteriormente, en el área del ático en el Bloque I y en el Bloque XII. Las variaciones de profundidad oscilan entre los 5800 ft en la zona norte, como la más somera, hasta los 8000 ft hacia el sur del Bloque XII. El buzamiento de la estructura es hacia el sureste, esto se puede corroborar con los datos de los topes en los pozos los cuales indican un aumento de la profundidad hacia el sureste. Por ser una superficie erosiva, el buzamiento es suave y no presenta mayor complejidad estructural.

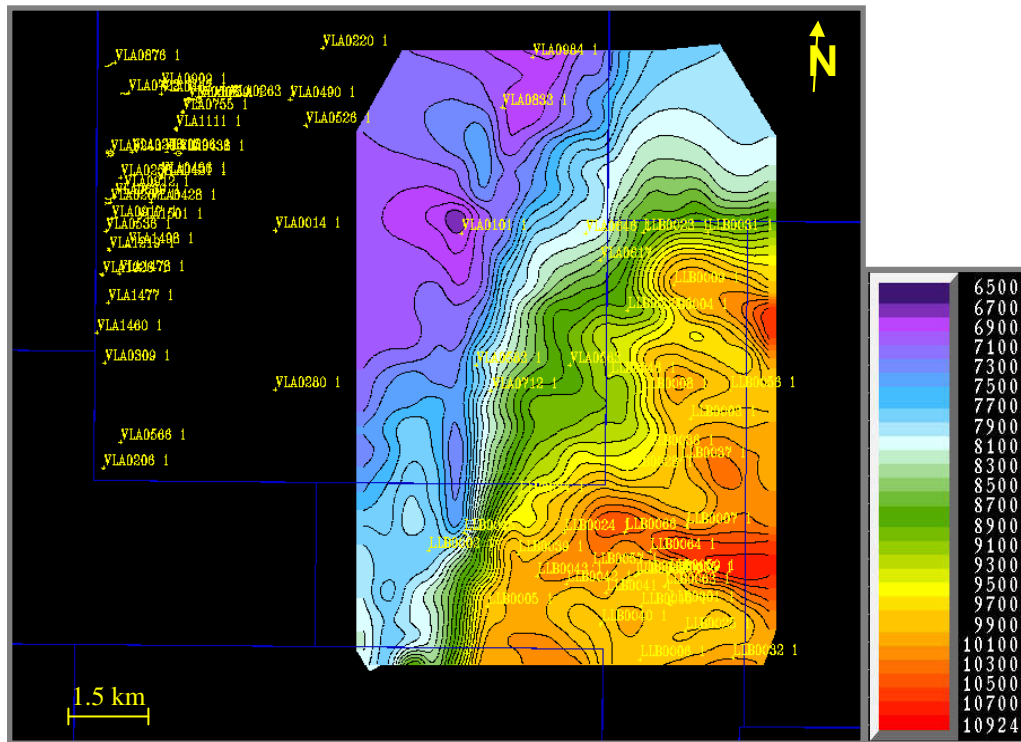


Figura 50. Mapa estructural en profundidad del horizonte C-4 de la Formación Misoa.

En la figura 50 se muestra el mapa estructural en profundidad del horizonte de C-4 perteneciente a la Formación Misoa, una de las cosas que más resaltan de este horizonte es su parcial erosión hacia la zona del ático en el Bloque I, en efecto dicho horizonte se acuña contra la Falla Lama-Este y no se encuentra registrado por ningún



XII. Para este mapa las profundidades oscilan entre los 6500 ft y los 10924 ft. El buzamiento continúa siendo hacia el sureste, como lo ha sido para toda la estructura.

La figura 52 presenta el mapa estructural en profundidad del horizonte C-6, una de las diferencias más notable con respecto a los otros dos horizontes es que esta superficie se manifiesta a lo largo de toda el área de estudio, es decir, no fue completamente erosionada en el Eoceno como ocurrió con todos los demás sedimentos suprayacentes. Pero al igual que los otros dos mapas, se siguen observando las fallas normales que afectaron la zona. Se puede observar una profundidad mínima de 6600 ft hacia el noroeste que se va incrementando hasta alcanzar los 11441 ft en el sureste.

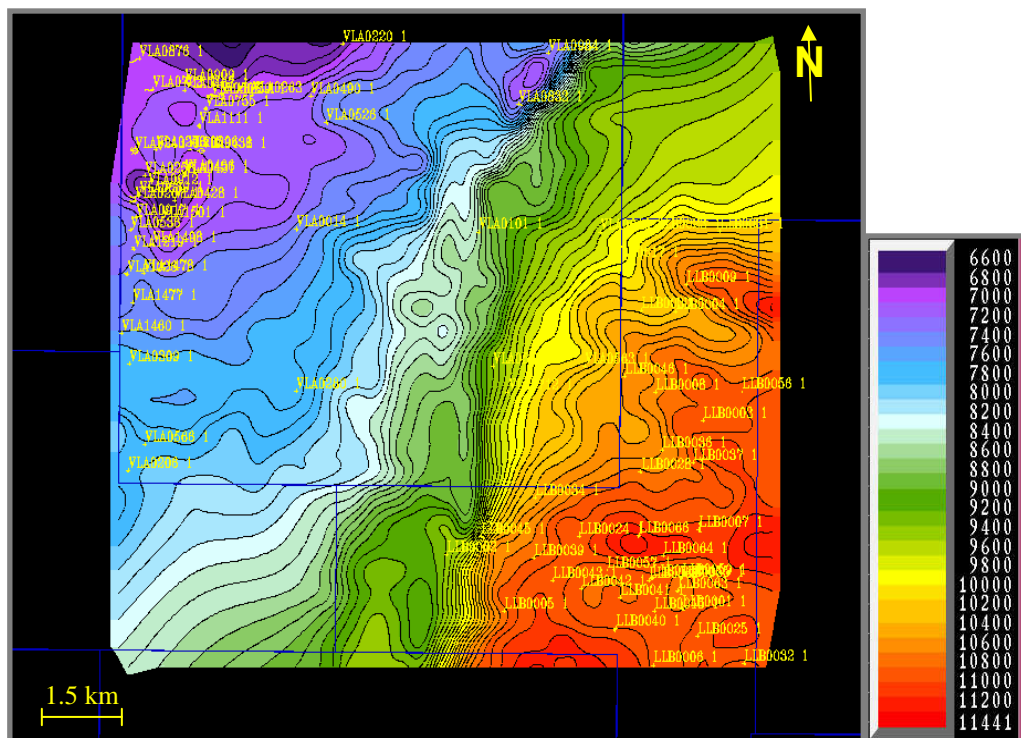


Figura 52. Mapa estructural en profundidad del horizonte C-6 perteneciente a la Formación Misoa.

En la figura 53, se puede observar el mapa estructural en profundidad del tope de la Formación Guasare, el cual muestra características muy parecidas a los demás

horizontes interpretados; el mismo sentido de buzamiento (sureste) con 7° de buzamiento, las zonas de discontinuidades asociadas a fallas normales. También se evidencia muy claramente el sistema de Falla Lama-Este. La profundidad mínima es aproximadamente 7200 ft en el noroeste y la máxima es de 13800 ft aproximadamente hacia el sureste.

Y por último, en la figura 54, se observan los planos de cada una de las fallas interpretadas en el área llevados a profundidad usando el mismo modelo de velocidad usado con los horizontes. En rojo se muestran las fallas Lama-Icotea y Lama-Este, mientras que en amarillo las fallas normales presentes en la zona.

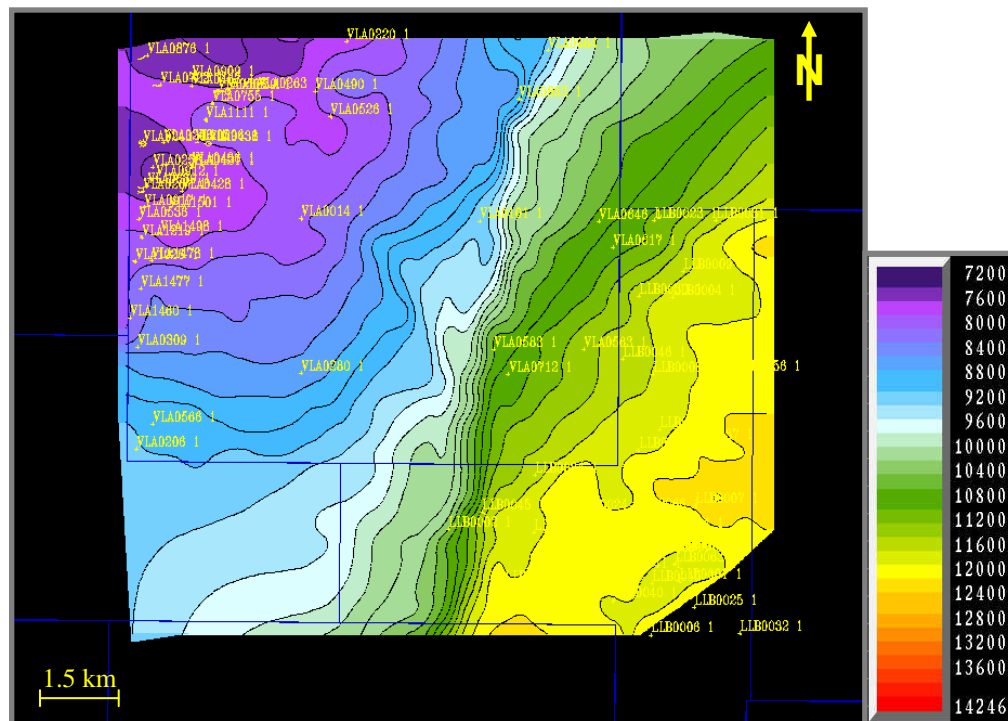


Figura 53 Mapa estructural en profundidad correspondiente al tope de la Formación Guasare, en el área de estudio.

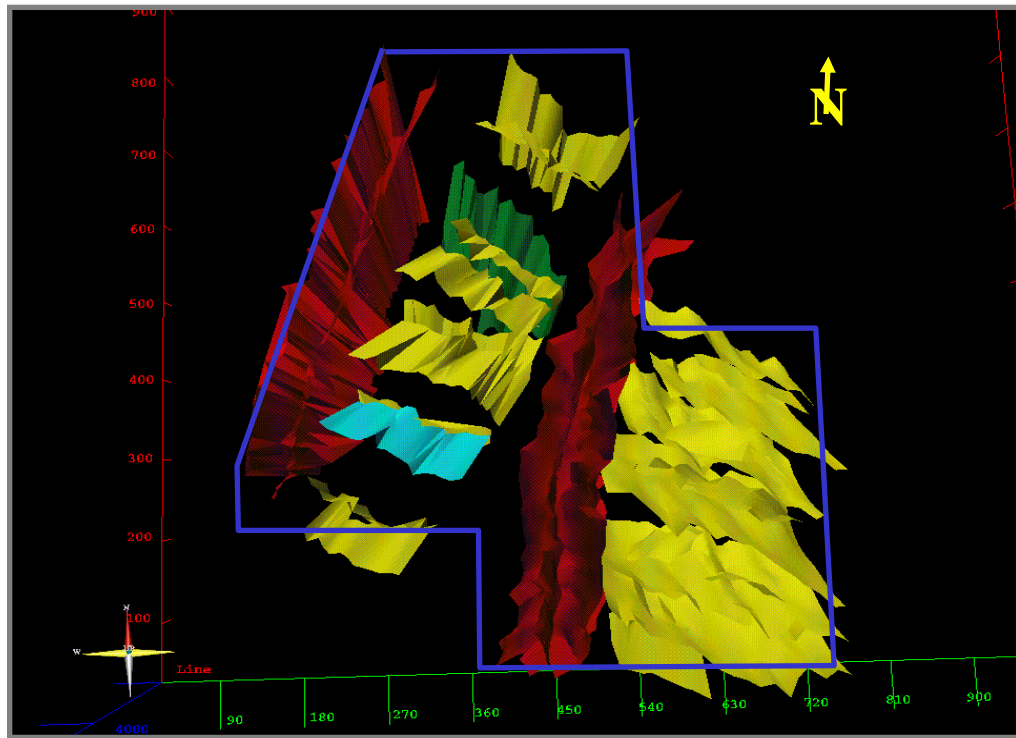


Figura 54. Vista superior del modelo 3D de todas las fallas interpretadas, en profundidad, en el área de estudio (recuadro en azul)

## **CAPITULO VI**

### **CORRELACIÓN DE ATRIBUTOS SÍSMICOS CON DATOS DE PETROFÍSICOS**

#### *Consideraciones teóricas*

El análisis de atributos sísmicos está generalmente desarrollado para correlacionar varios de ellos con propiedades de los yacimientos. Aunque los intérpretes más experimentados han desarrollado una intuición para saber cuales atributos exhiben una buena correlación con propiedades particulares de los yacimientos, las correlaciones entre estas propiedades y los atributos no pueden ser extrapoladas de un yacimiento a otro. Aunado a esto, el análisis se hace mucho más difícil cuando el número de atributos es muy grande (Michelena, 1998). Aunque algunos atributos parecieran proveer diferente información sobre cambios laterales en el área de estudio, algunas veces también pudieran contener información redundante que hace el análisis muchos más engorroso.

Una vez discutido algunas consideraciones, se procedió a calcular los valores de la variable petrofísica con la cual se van a correlacionar los atributos. Para este caso se obtuvieron los valores de arena neta total (ANT) en el intervalo de interés, el cual corresponde a C-5+44ms. Esta información fue proporcionada por el petrofísico de la unidad. En la tabla que se muestra a continuación se pueden observar dichos valores.

Cabe destacar que la correlación se enfocó en las adyacencias de los pozos LLB0059 y LLB0064, por el interés económico para la industria en el momento de realizar el estudio. Esta área puede visualizarse en la figura 55.

Pozo	ANT (ft)	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
LLB0002	20	222.144	1.104.285
LLB0015	30	226.291	1.103.201
LLB0024	20	224.883	1.104.697
LLB0025	20	227.148	1.1027.01
LLB0046	12	225.700	1.107.756
LLB0059	70	226.856	1.103.853
LLB0061	105	226.184	1.103.787
LLB0064	86	226.456	1.104.264
LLB0066	100	225.984	1.104.655

Tabla 4 Valores de ANT en el intervalo C-5+44ms para cada uno de los pozos que se usaron para realizar el estudio de similitud.

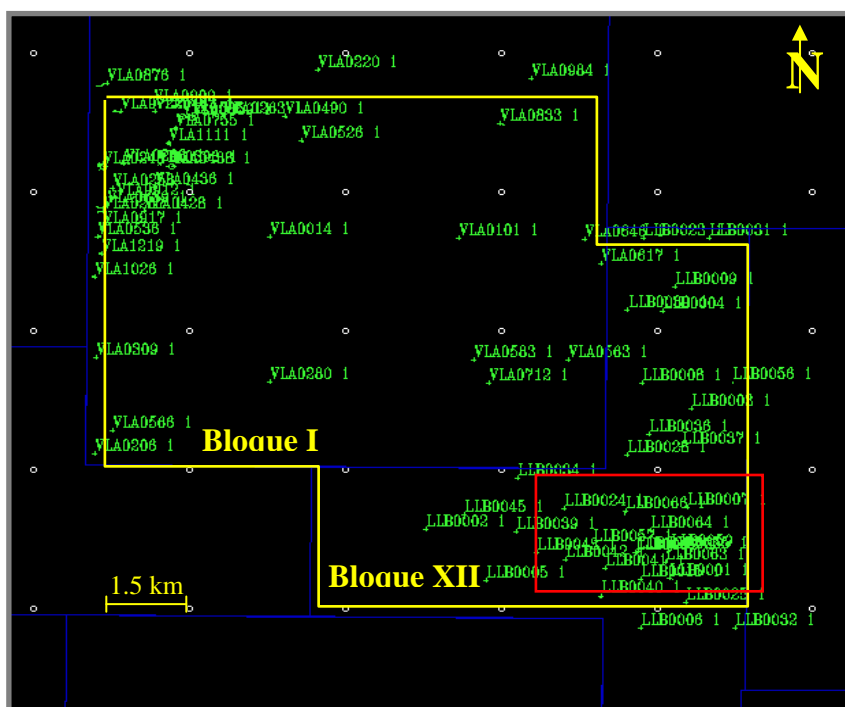


Figura 55 Área en donde se enfocó el estudio de correlación sísmica/petrofísica.

Con los atributos obtenidos, se calculó la matriz de correlación (tabla 5) entre los atributos y la propiedad petrofísica en cuestión. En dicha matriz se observó que el valor del coeficiente de correlación más alto (71% aprox.) corresponde al atributo de



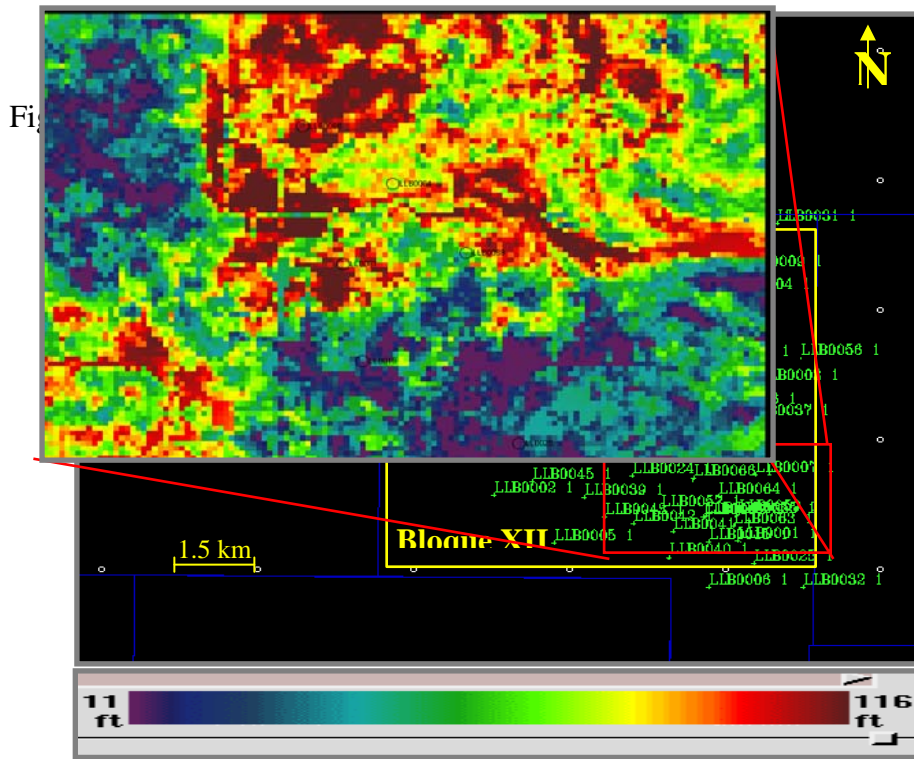


Figura 57 Mapa de ANT con un 70.95% de correlación con el atributo Energía total y amarrado a los pozos del área.

En cuanto a las diferencias que presentan estos dos mapas, se pueden observar algunas como en la zona más sureste, en la cual cambia por completo los valores de espesor de ANT con el amarre hecho con los pozos. A pesar de estas diferencias, en ambos mapas los valores de ANT oscilan entre los 11 pies, como los mínimos, y 116 pies como los máximos. Finalmente, los dos mapas muestran una tendencia preferencial que pudiera ser atribuida a la respuesta de un canal

## **CAPITULO VII**

### **IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FACIES SÍSMICAS**

#### *Consideraciones teóricas*

El uso de los datos sísmicos en el pasado había sido predominantemente para determinar la estructura de los yacimientos, sin embargo también es muy importante la información estratigráfica y depositacional que los datos sísmicos pueden proporcionar. Es por ello que se ha estado incrementando el uso de esta información para facilitar el mapeo de las facies sísmicas y con esto poder delimitar de una manera mucho más eficaz la geometría de los yacimientos, así como también caracterizar su heterogeneidad. Todo esto surge de la necesidad de buscar hidrocarburo en aquellos yacimientos de menor tamaño y de mayor complejidad geológica

Ya se ha explicado que la zona en estudio presenta una alta complejidad geológica, lo cual la convierte en un área interesante para la realización de un estudio de identificación y clasificación de las facies sísmicas basados en el análisis de mapas de similitud y en análisis de las respuestas de los datos sísmicos, haciendo uso de redes neuronales. Para lograr este objetivo se hizo uso de la aplicación SIMILITUD para generar los mapas de similitud y de la aplicación *Stratimagic*® de la suite *Epos3*® de *Paradigm*™ para el estudio de las facies sísmicas.

Las redes neuronales se han convertido en una herramienta muy poderosa en el trabajo de identificación y clasificación de facies sedimentarias por su eficacia en el momento de realizar esta tarea. Pero siempre es necesario el criterio del geólogo o geofísico para no perder el sentido geológico de la investigación. Dicha tecnología trabaja de la siguiente forma (figura 58): toma un dato de entrada, que puede ser cualquier atributo sísmico que se tenga disponible, luego el algoritmo realiza una

serie de comparaciones iterativas en la cual se entrena para entonces buscar esta característica de entrada en toda el área de interés.

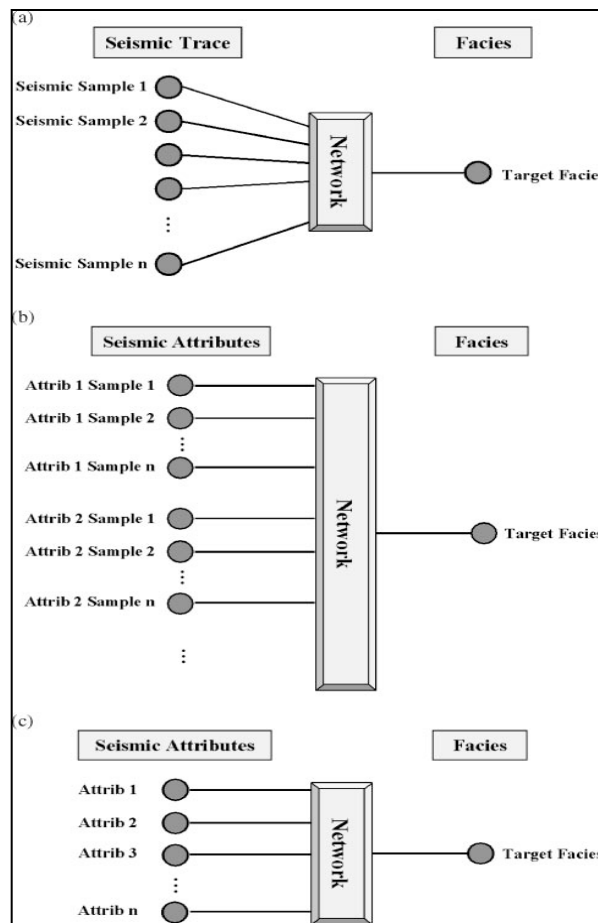


Figura 58. Esquema de trabajo de las redes neuronales basado en (a) en la traza sísmica, (b) múltiples atributos sísmicos instantáneos y (c) atributos sísmicos en múltiples intervalos. Tomado de Saggaf (2003).

En una primera fase un análisis de mapas de similitud contribuye a visualizar el comportamiento de las propiedades de la roca y su distribución espacial con respecto a un pozo en específico. Los resultados de estos mapas pudieran dar una idea de las tendencias en la depositación que tienen ciertos cuerpos sedimentarios y así poder realizar un estudio de facies sísmicas con mayor soporte.

Dicho esto, se procedió a generar los mapas de similitud en el intervalo C-5+44ms. Los datos de entrada para generar los mapas de similitud son: un conjunto

de atributos sísmicos sin correlacionar, las coordenadas del punto de control y el radio alrededor del punto control que encierra un área con respuesta sísmica constante. Los mapas de atributos sísmicos usados para el análisis de similitud deberán ser independientes para evitar introducir información redundante que pudiera influenciar los resultados con algunas tendencias preferenciales. Los atributos usados fueron los mismos que se usaron para hacer la correlación atributos/petrofísica, frecuencia instantánea promedio, fase instantánea promedio, amplitudes RMS, amplitud total y energía total. El último atributo, energía total, fue descartado por proveer información redundante. A continuación se presenta la matriz de correlación entre los atributos estudiados.

<b>Atributo sísmico</b>	<b>Frecuencia instantánea promedio</b>	<b>Fase instantánea promedio</b>	<b>Amplitudes RMS</b>	<b>Amplitud total</b>
<b>Frecuencia instantánea promedio</b>	1	0.01989	0.23385	-0.16578
<b>Fase instantánea promedio</b>	0.01989	1	-0.3272	-0.16578
<b>Amplitudes RMS</b>	0.23385	-0.3272	1	0.15194
<b>Amplitud total</b>	-0.16578	-0.10925	0.15194	1

Tabla 6 Matriz de correlación entre los atributos generados para el análisis de similitud y posterior identificación y clasificación de facies sísmicas.

El proceso para generar los mapas de similitud consta de tres pasos fundamentales: (1) cálculo de los valores de referencia; aquí se calculan la media y la desviación estándar de los atributos en la ventana de tiempo de interés alrededor del

punto de control. (2) clasificación de los valores calculados; para realizar esto se calcula el valor medio de un atributo alrededor de un punto en un área igual a la zona de referencia. Si la media alrededor del punto está muy cerca al valor de la media en la zona de referencia, un valor alto es asignado, típicamente 1. Si por el contrario, el valor no se parece se le asigna al punto un valor nulo 0. Este procedimiento se repite n-veces tanto atributos sísmicos linealmente independientes se tengan. (3) El último paso es la suma de todos estos valores calculados en un solo mapa lo cual da como resultado el mapa de similitud (figura 59).

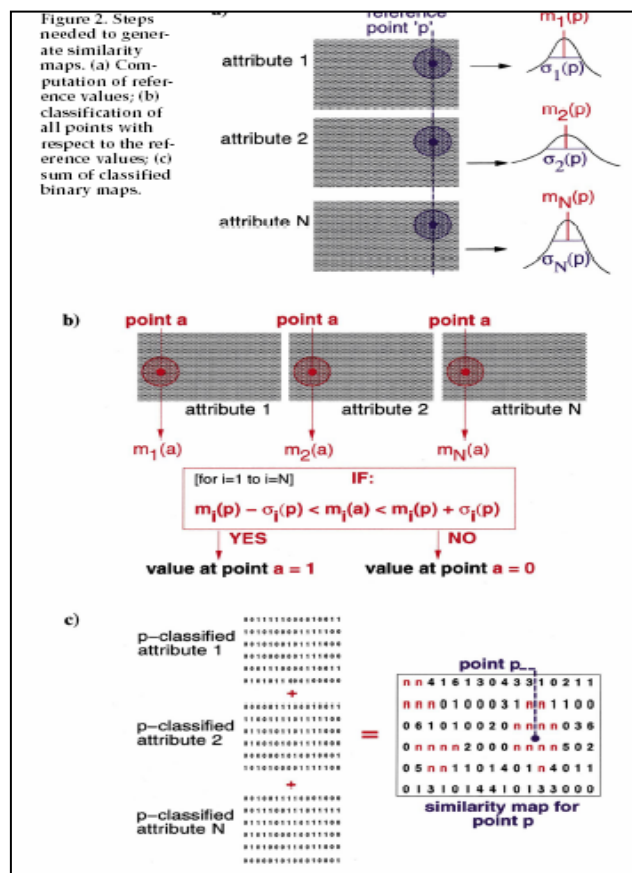


Figura 59. Esquema de los pasos necesarios para generar los mapas de similitud. Tomado de Michelena 1998.

Si el punto de control es un pozo productor, las zonas de alta similitud sísmica podrán ser relacionadas con él y pueden ser clasificadas como zonas con alta prospectividad. Caso contrario si el punto de control es un pozo no productor.

### ***Generación y análisis de mapas de similitud***

Para generar los mapas de similitud, es necesario primero determinar cuales de los atributos sísmicos extraídos son linealmente independiente, los cuales serán los que aporten información no redundante. La aplicación *Seisclass*® del ambiente integrado *Geoframe*®, realiza este paso.

Los atributos generados, linealmente independientes, para este estudio fueron los siguientes: frecuencia instantánea, fase instantánea, amplitudes RMS, amplitud total y energía total. Estos atributos fueron generados en *Poststack Pal*®. Hay que resaltar que el intervalo de interés sobre el cual se generaron los atributos fue desde el tope de la arena C-5 hasta 44 milisegundos por debajo de ella, o lo que es equivalente en profundidad a 300 ft.

Escoger el punto de control o pozo de interés alrededor del cual se va a generar los mapas de similitud es un paso importante, en este caso se escogieron los pozos LLB0059 y LLB0064 los cuales presentan las mejores producciones acumuladas hasta la fecha de petróleo. Otro factor importante es el tamaño de la zona de referencia, dicha zona se estableció en 80 metros. Una vez establecidos todos estos parámetros se generaron los mapas en un archivo ejecutable de ambiente UNIX llamado SIMILITUD, desarrollado por PDVSA-Intevep. Los mapas resultantes se pueden visualizar en las siguientes figuras (60 y 61):

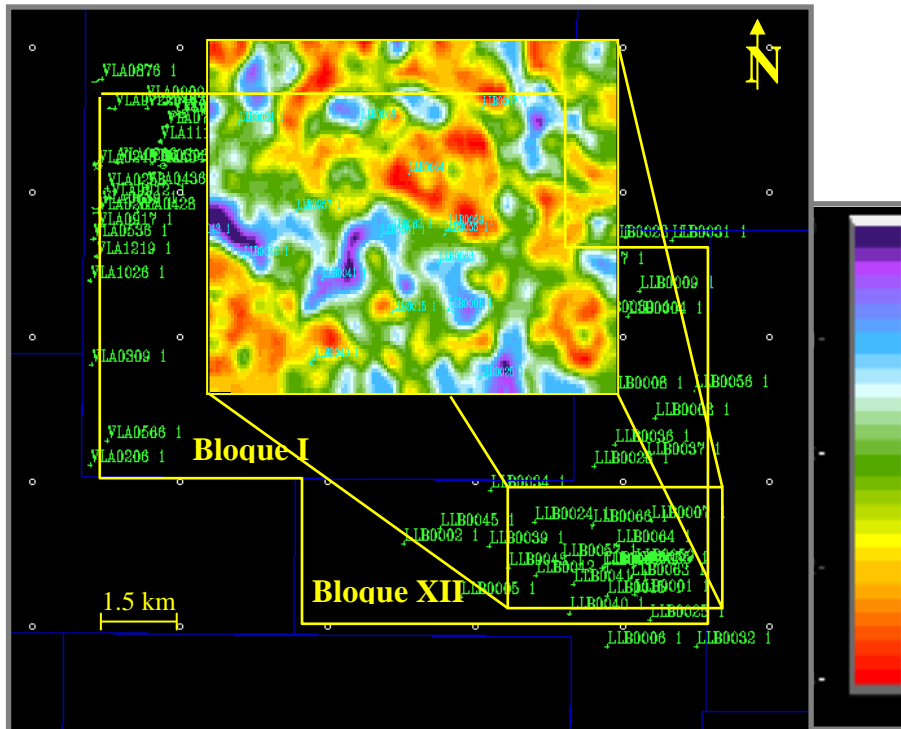


Figura 60 Mapa de similitud generado en las adyacencias del pozo LLB0059, con un radio de 80 metros y en el intervalo C-5+44ms

En el mapa mostrado anteriormente, figura 60, se observa la similitud que existe entre las propiedades del pozo LLB0059 en las adyacencias en el intervalo C-5+44ms. Estas similitudes son las respuestas sísmicas que tiene la zona de manera constante y puede ser atribuida a isopropiedades de las rocas. Por otra parte, el mapa muestra una tendencia preferencial, la cual es NO-SE.

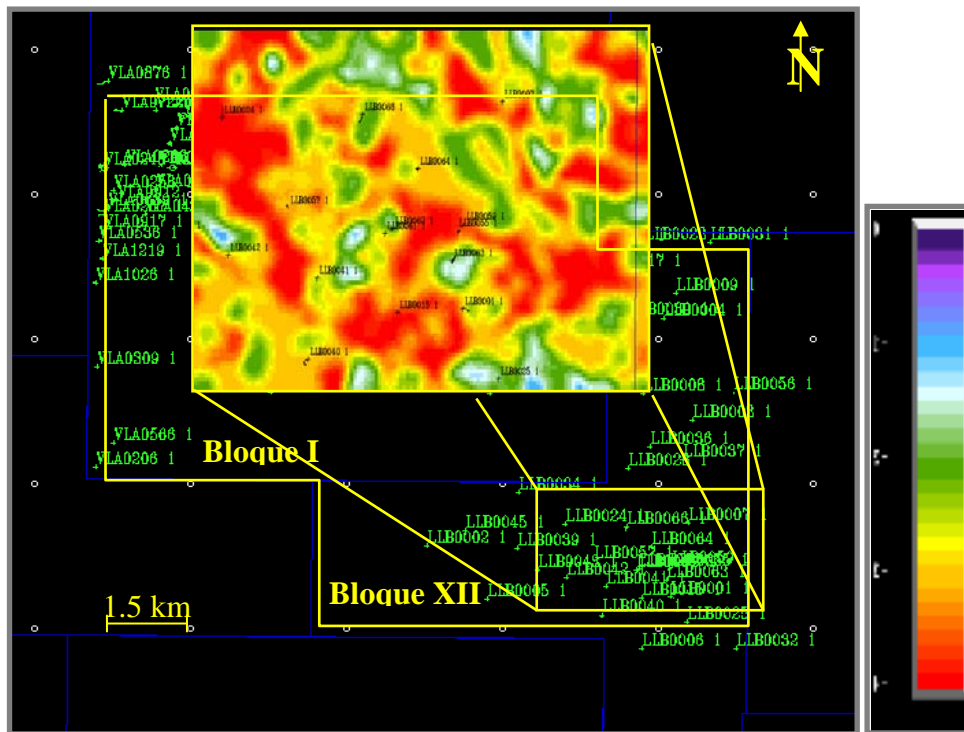


Figura 61 Mapa de similitud generado en las adyacencias del pozo LLB0064, con un radio de 80 metros y en el intervalo C-5+44ms

### ***Generación y extracción de mapas de facies sísmicas***

Ahora, la metodología que se empleó para generar los mapas y los volúmenes de facies sísmicas con *Stratimagic®*, consistió de la siguiente manera:

En una primera etapa se cargaron los horizontes de interés; C-4, C-5 y C-6. Todos los datos correspondientes a los pozos fueron cargados de manera interactiva haciendo una conexión directa con la base de datos de *OpenWorks®*. Luego de haber cargado todo lo necesario se procedió a hacer un chequeo de la calidad de los datos.

Una vez revisada la calidad del dato, es importante para un estudio de este tipo establecer un intervalo de trabajo, esto se hace con los datos de producción de pozos que se tenga disponible. En este caso, los datos de producción indicaban como buen intervalo de trabajo el paquete de arena C-5, de esta manera se generó un primer mapa de clasificación en todo el intervalo de la arena C-5. Otro punto que hay que aclarar es definir la extensión del área de interés, esta área se enfocó en el Bloque XII

por tener mayor expectativa de producción que el sur del Bloque I. En la figura 62 se puede observar el mapa resultado de esta clasificación. En éste se puede visualizar como los pozos productores están asociados una misma facies, por lo cual esa facie se determinó como de buena calidad. En esta primera clasificación se estableció en 7 el número de clases.

En la misma figura, al igual que en los mapas estructurales en tiempo y profundidad se pueden observar las zonas de discontinuidades asociadas a fallas, también se pueden observar los bruscos cambios laterales de facies. Esto pudiera estar asociado a la gran variabilidad que tiene la forma de la traza sísmica en el intervalo estudiado ya que pudiera ser muy grande lo cual estaría incluyendo distintos paquetes de arenas que pertenecen a diferentes facies. Sin embargo, en una primera instancia, se puede analizar que el patrón de depositación de los sedimentos es en sentido NOO-SEE y dicha depositación estuvo controlada por una fuerte componente estructural que son las fallas de la zona. En la figura 63 se pueden observar las formas de las trazas sísmicas más representativas para cada una de las 7 clases generadas

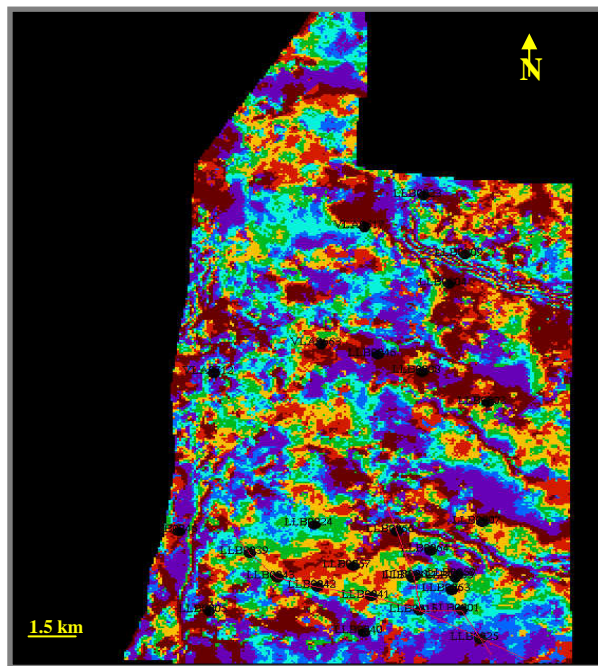


Figura 62. Mapa de clasificación de facies sísmicas en todo el paquete de arena C-5, en el norte del bloque XII, con los pozos del área. Nótese que los pozos productores (área sur del mapa) están asociados a una misma facie (color rojo)

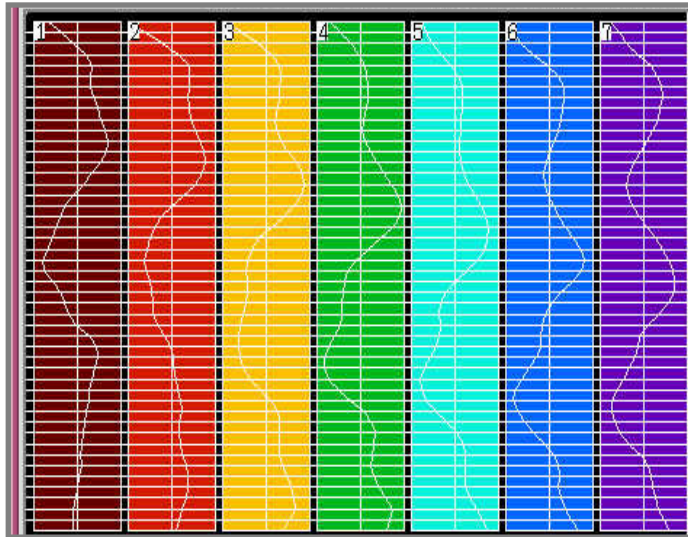


Figura 63 Modelo de la traza sísmica más representativa para cada una de las 7 clases generado sobre el paquete de la arena C-5. La clase 2 (rojo) es la que está asociada a los pozos productores

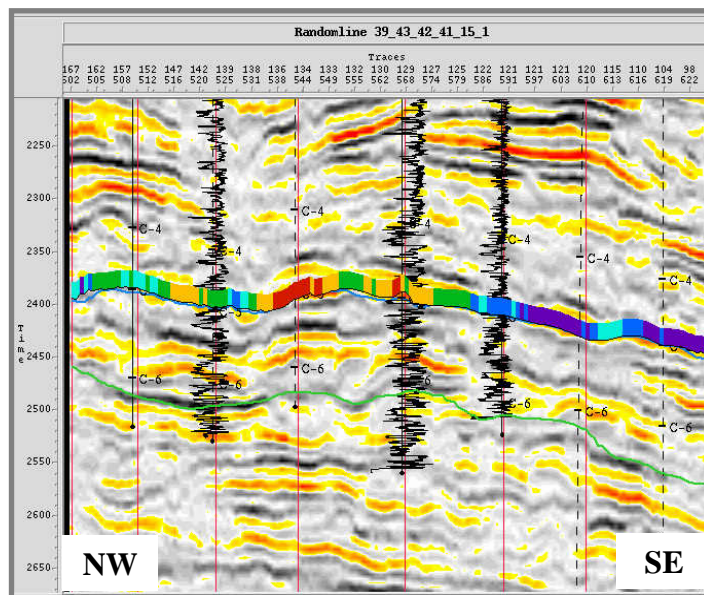


Figura 64 Línea arbitraria que pasa por los pozos LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001. Con la proyección del mapa de facies generado en todo el intervalo de C-5

En la figura anterior (figura 64) se puede ver la proyección del mapa de facies generado a lo largo de todo el paquete de arena de C-5 en una línea sísmica arbitraria que atraviesa los pozos productores LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001, en esta línea se puede observar la buena respuesta del registro de Gamma Ray a nivel de C-5.

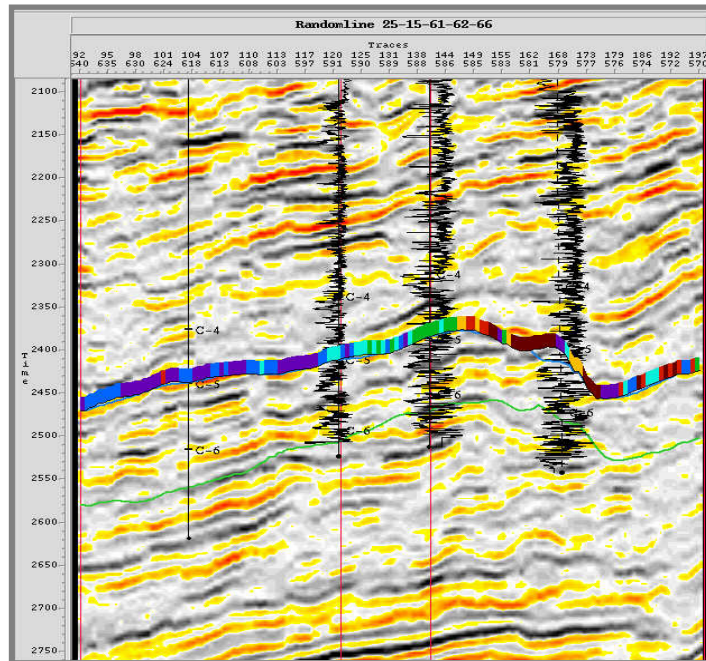


Figura 65 Línea arbitraria que atraviesa los pozos LLB0025, LLB0015, LLB0061, LLB0062, LLB0066 con la proyección del mapa de facies generado en el intervalo de C-5.

Al igual que la línea anterior, la figura 65 muestra la buena respuesta que hay en el registro de Gamma Ray en el intervalo analizado. Sin embargo, se puede distinguir un buen desarrollo de arenas en el tope, medio y base del intervalo intercalados con unas lutitas. Hay que resaltar que para este primer mapa de identificación y clasificación se usó solo el atributo sísmico de amplitud. También se destaca que todo el análisis de facies sísmicas se realizó en la sísmica con procesamiento HFI, la cual por su carácter de recuperar las altas frecuencias presenta muchos eventos caóticos, que dificultan un buen seguimiento de los eventos sísmicos.

La figura 66, muestra un segundo mapa de clasificación de facies pero en un intervalo que va desde el tope de C-5 hasta 44 ms por debajo, el cual abarca las arenas superiores de C-5. En dicho mapa se puede visualizar la misma tendencia de depositación de los sedimentos y el mismo control estructural dado por las fallas de la zona. Para dar un poco más de definición al mapa se usaron 9 clases (figura 67), se puede distinguir de una manera mucho mejor la geometría de los cuerpos sedimentarios en la zona, sobre todo hacia la zona sur, de igual forma se sigue viendo

que los pozos productores se encuentran asociados a una misma clase y los que no son productores a una clase distinta

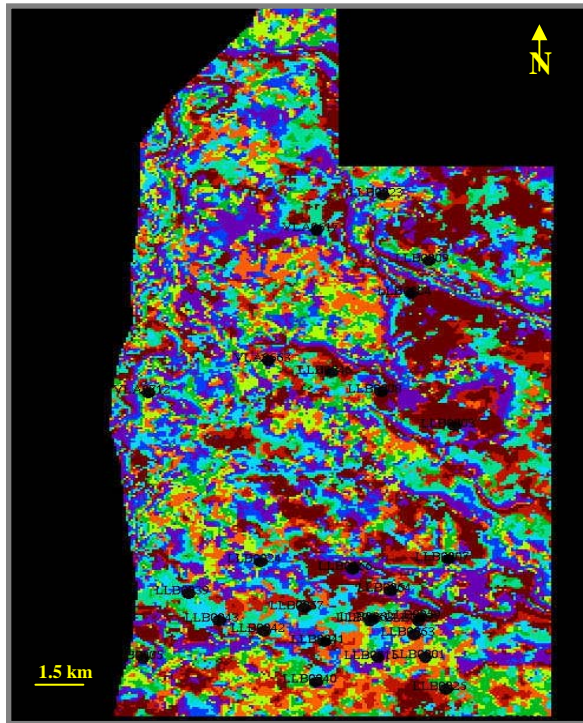


Figura 66 Mapa de clasificación de facies generado sobre el intervalo C-5+44ms. Se distinguen una mejor geometría de los cuerpos pero la tendencia sigue siendo la misma (NWW-SEE).

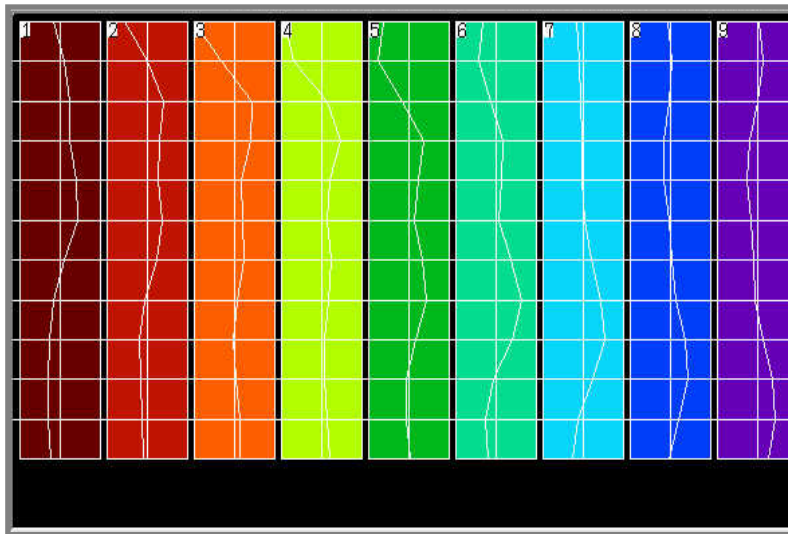


Figura 67 Modelo de las trazas sísmicas más representativas para cada una de las 9 clases, generado en el intervalo C-5+44ms. Nótese que la clase 1 y 2 son la que representan a los pozos productores.

En la línea sísmica arbitraria que atraviesa los pozos LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001 (figura 68) y los pozos LLB0025, LLB0015, LLB0061, LLB0062 y LLB0066 (figura 69), se puede visualizar la buena respuesta que tiene el registro de Gamma Ray. Esto pudiera traducirse en el desarrollo de una buena arena. También hay que resaltar que se observan bruscos cambios laterales de facies que, como se analizó anteriormente, está controlado por fallas.

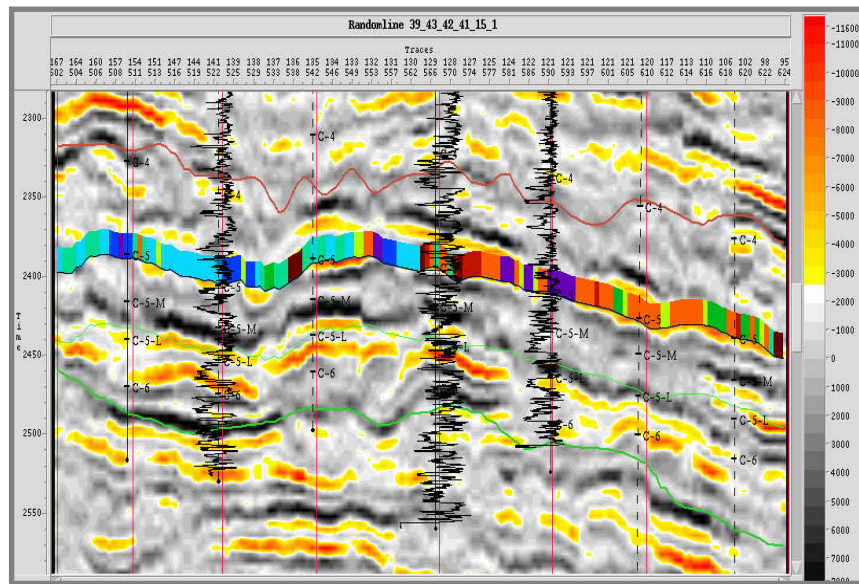


Figura 68 Línea arbitraria que incluye los pozos LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001. Esta línea contiene el intervalo C-5+44ms con la proyección del mapa de clasificación y el registro de Gamma Ray para cada uno de los pozos.

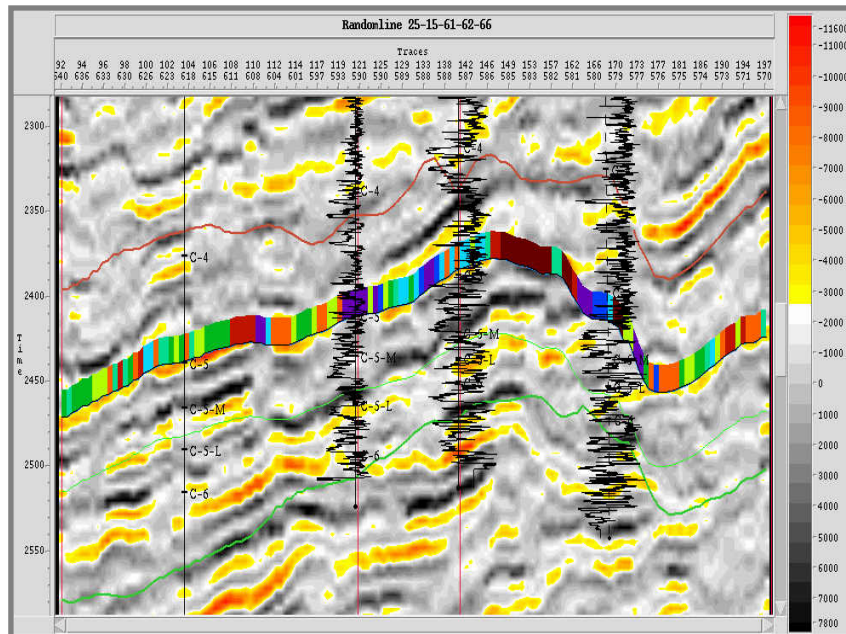


Figura 69 Línea arbitraria con los pozos LLB0025, LLB0015, LLB0061, LLB0062 y LLB0066. En esta figura se puede observar la proyección del mapa de clasificación de facies en el intervalo C-5+44ms. Nótese la fuerte componente estructural que controla el área y la caótico de la continuidad de los reflectores.

Así como se generaron mapas de facies sísmicas sobre los intervalos antes nombrados, se generó un volumen de facies sísmica sobre todo el paquete de arena C-5 con el objetivo de poder visualizar de mejor manera la influencia de la componente estructural en el área. En las figuras 70 y 71 se muestran los resultados de este análisis y como se dijo anteriormente se puede evidenciar los cambios laterales de facies asociados a discontinuidades de los reflectores pudiendo estar relacionados con fallas. Para generar este volumen de facie se eligió todo el intervalo correspondiente a C-5 y se cargaron los atributos de amplitud y de “*dip*”, este ultimo da la componente estructural necesaria.

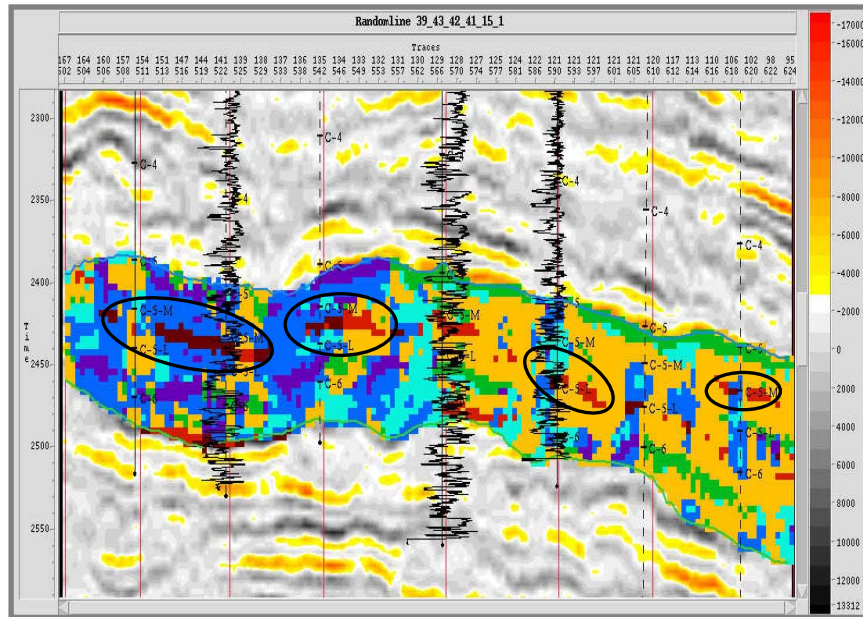


Figura 70 Línea arbitraria que atraviesa los pozos LLB0025, LLB0015, LLB0061, LLB0062 y LLB0066. Nótese los cambios de facies asociados a zonas de discontinuidades en los reflectores sísmicos

La figura 71 muestra lo que se explicó anteriormente, en ésta línea sísmica se observa la facie de color rojo (encerrada en círculos) como se asocia a una buena respuesta en registros de Gamma Ray pero también se observa la discontinuidad que presenta por causa de las fallas.

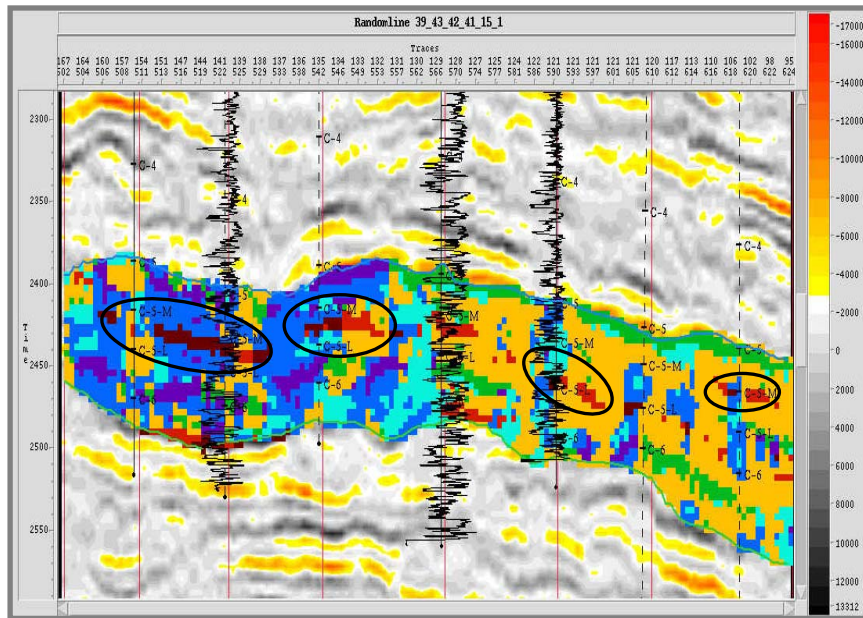


Figura 71 Línea arbitraria que incluye los pozos LLB0039, LLB0043, LLB0042, LLB0041, LLB0015 y LLB0001. Encerrado en círculos se encuentra la facie de interés. Observe la discontinuidad de dicha facie.

## **CAPITULO VII.**

### **ÁREAS PROSPECTIVAS**

Uno de los puntos más importantes en todo estudio de interpretación sísmica y análisis de atributos es el generar como resultado final puntos para futuras localizaciones de pozos. Es por ello que en este capítulo se realizó la integración de toda la información generada durante el estudio, con la finalidad de ubicar en el intervalo de interés uno o unos puntos con características específicas que pudieran considerarse como prospectos.

En dicha integración se toma en cuenta los siguientes factores: el marco estructural definido en la zona; que pudiera delimitar estructuralmente un área prospectiva de otra, los atributos sísmicos estratigráficos; los cuales pudieran indicar cambios laterales de litologías y también posibles trampas estratigráficas de hidrocarburos, las propiedades petrofísicas de las rocas; en donde se pueden observar las características de la roca reservorio. Por otra parte, también hay que tomar en cuenta que por la naturaleza de la gerencia en donde se trabajó (U.E Lagomar) el distanciamiento entre los pozos no debe ser menor a 600 mts para no afectar el radio de drenaje entre pozo y pozo, pero tampoco puede sobrepasar esa distancia, ya que sino el punto a proponer se pudiera considerar exploratorio y no de avanzada o delimitador de un yacimiento.

El siguiente análisis hecho muestra al área del pozo LLB0066, sur del Bloque XII, con un alto nivel prospectivo. En la figura 72 se puede observar la integración del volumen de facies generado en la zona con la interpretación estructural. Se puede concluir que el objetivo del punto propuesto es penetrar en las mismas facies de los pozos productores vecinos lo cual indica que es el mismo nivel estratigráfico. También se puede observar que el punto penetraría el bloque levantado de la falla normal que se encuentra en la zona.

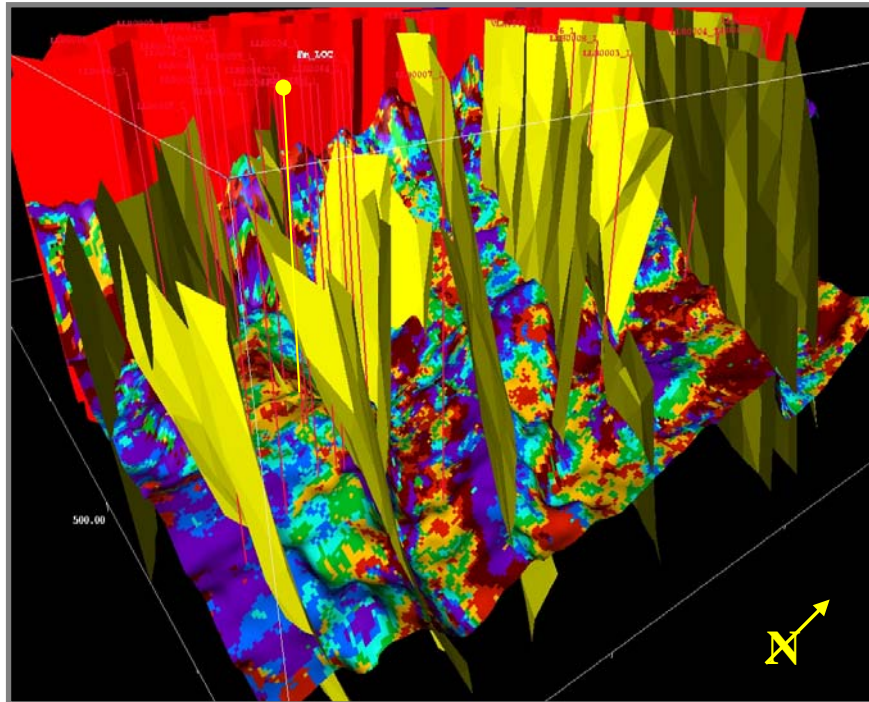


Figura 72 Visualización 3D del marco estructural con el mapa de facies sísmica, generado en la zona.

La figura 73 presenta una integración del mapa de frecuencia instantánea generado en el área del LLB0066, con la interpretación estructural. Encerrado un círculo se muestran los pozos productores del área, se puede corroborar que todos estos pozos se localizan en el bloque levantado de la falla normal. El punto que se propone estaría ubicado en la parte más occidental del círculo, esto para respetar la distancia del radio de drenaje.

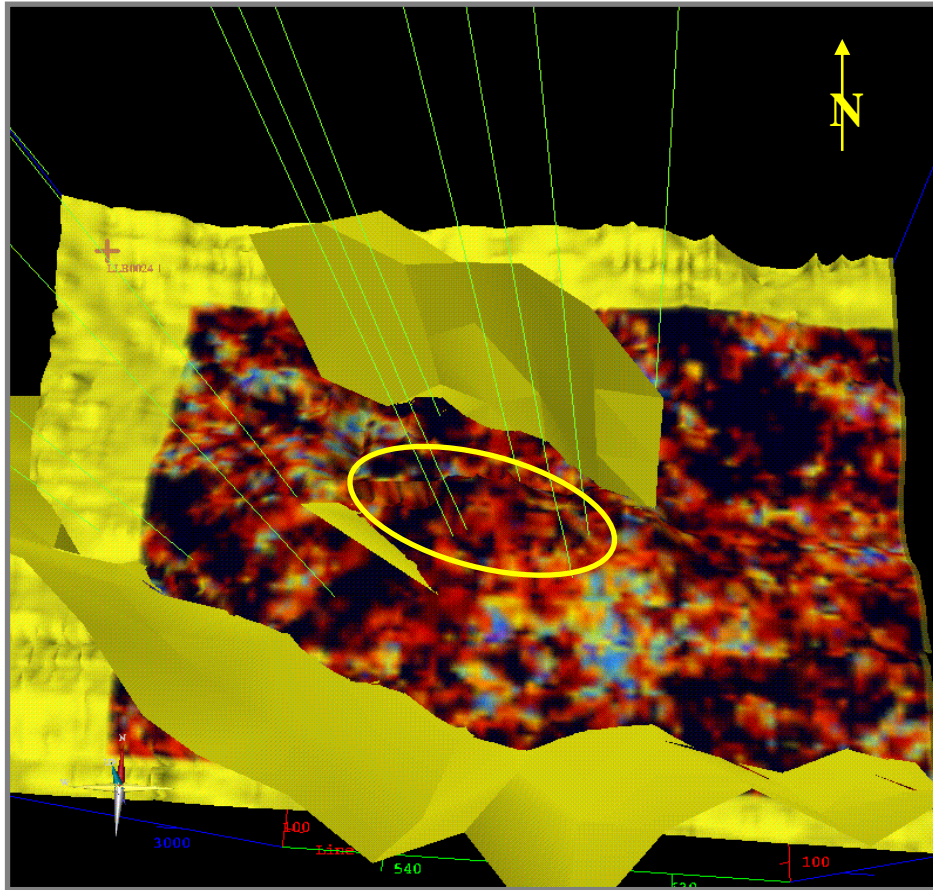


Figura 73 Visualización 3D del modelo estructural a nivel del intervalo C-5+44ms con el mapa de frecuencia instantánea. Nótese el comportamiento de las frecuencias en el área encerrada en el círculo

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### *Conclusiones*

- El marco estructural del área (sur del Bloque I y norte del Bloque XII) está influenciado por los regímenes tectónicos ocurridos en la cuenca, iniciándose en el Jurásico con la fase tensional del *rifting* y continuando luego con la inversión tectónica a partir del Eoceno medio y Eoceno superior.
- La estructura interpretada tiene un buzamiento al sureste, lo cual da indicio de que la Cuenca sufrió un basculamiento después de la depositación de la secuencia del Eoceno.
- El estilo estructural del Bloque I en el área sur en la zona del Pilar se caracteriza por la presencia de fallas normales con dirección ONO-ESE y buzamiento hacia el NE dispuestas en forma escalonadas, generadas posiblemente en la fase tensional ocurrida después del Eoceno como resultado del efecto de la Orogénesis de los Andes. Esta misma configuración se repite en el Bloque XII.
- Los mapas de atributos sísmicos estructurales (*dip-azimuth* y *edge*) obtenidos en los topes de la Formación Guasare, C-6 y C-5 permitieron detectar fallas (más pequeñas) con rumbo ENE-OSO perpendiculares a las fallas normales nombradas anteriormente. De igual forma, corroboraron el estilo estructural explicado para las fallas principales.
- La tendencia mostrada en los mapas de facies sísmica revela un sentido de depositación aparente, para el nivel estudiado que es C-5 superior, ONO-ESE.

- La integración y correlación de los atributos sísmicos con los datos petrofísicos generó un alto coeficiente de correlación, lo que indica que las variables estudiadas guardan una buena relación.
- Los mapas de similitud ayudaron a visualizar la tendencia de la depositación de las secuencias estudiadas como un preámbulo a la identificación y clasificación de las facies sísmicas, la cual fue estimada en SSE-NNO.
- Se pudo observar en los mapas de facies que aquellas zonas en donde se evidenciaban cambios bruscos de facies sísmicas correspondían a zonas de discontinuidades o zonas con presencia de fallas.
- Los mapas de facies sísmicas generados a partir de la tecnología de redes neuronales dan resultados más confiables que un análisis convencional, debido a que las redes neuronales se basan en la información del dato sísmico como tal, es decir, forma de la traza, a diferencia del estudio convencional que se basa en la interpretación de los reflectores de interés
- Los volúmenes de facies sísmicas generados mostraron un alto control estructural en el momento de la depositación de las secuencias estudiadas.

### ***Recomendaciones***

- Realizar un estudio o modelo sedimentológico en las arenas C para darle continuidad al estudio de identificación y clasificación de facies sísmicas y así dar mayor soporte a los resultados generados.
- Obtener tiros de verificación sísmica, registros sísmicos y registros de densidad en las futuras localizaciones para mejorar el proceso de calibración sísmica-pozo.
- Realizar inversión sísmica en el área, con la finalidad de obtener distribuciones espaciales de velocidades e impedancias acústicas las cuales probablemente serán representativas de las variaciones laterales de las propiedades de las rocas.
- Efectuar un estudio de balanceo dinámico para reconstruir la geología de la zona.
- Realizar un análisis petrofísico en donde se involucren mucho más variables petrofísicas para reconocer de manera más confiable los patrones sedimentológicos del área.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bellizia, A. (1956). **“Geología de las cuencas sedimentarias de Venezuela y de sus campos petrolíferos”**. Boletín de geología, Caracas. Publicación especial 2.
- Briceño, G. (1999) **“Comparación e interpretación de dos levantamientos sísmicos 3D, Bloque I Lago de Maracaibo”**. Trabajo Especial de Grado. UCV, inédito. Caracas. 99p
- Brown, A. (1996). **“AAPG Memoir 42. Interpretation of three-dimensional seismic data”**. Fourth edition, Tulsa-Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists. 424 p.
- Bueno, E y Pinto J. (1996) “Geología estructural del alto de Icotea, lago de Maracaibo”. Documento técnico. PDVSA.**
- Chen, Q. y Sidney, S (1997a). **“Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring”**. The Leading Edge, 16 (5): 445-456.
- Dorn, G., Tubman, K y Cole M. (1994). **“Visualization in 3D seismic reservoir interpretation”**. S.O.V.G. Memorias del VII Congreso venezolano de geofísica, Caracas 131-134 p.
- Ghosh S., Meléndez L., Pestman P y Zambrano E. (1996) **“El Eoceno en la Cuenca de Maracaibo: Evolución Tectosedimentaria”**. S.O.V.G Memorias del VIII Congreso venezolano de geofísica, Maracaibo. 52 p.

González de Juana, C., Iturralde de Arozena J. M. y Picard X (1980). **“Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas”**, Tomo II, Caracas: Ediciones FONINVES. 1032 p.

Hart, Bruce (2002). **“Validating seismic attribute studies: Beyond statics”**. The Leading Edge, 21 (10): 1016-1021.

**Hernández, R. (2001) “Interpretación y definición del marco sísmico estructural 3D, área VLA-206, Formación Guasare, Bloque I, U.E Lagomar”. Trabajo especial de grado U.C.V, inédito. Caracas. 111 p.**

LANDMARK (2001). **“PostStack Family Reference Manual”**. Landmark Graphics Corporation. 443 p.

Léxico Estratigráfico de Venezuela (1997). Página web de PDVSA. Disponible: [www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico) [Consulta: 2005, septiembre 20]

Lugo, J. (1992) **“Historia tectónica a lo largo de los sistemas de fallas de Icoetea y Pueblo Viejo, Cuenca de Maracaibo”**. S.O.V.G. Memorias VI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas. 118-124 pp.

Michelena R., Ezequiel G., y Mariangela C. (1998). **“Similarity analysis: a new tool to summarize seismic attributes information”**. The Leading Edge, 23 (4): 878-881

Noguera, P. (1983). **“Conceptos básicos en el diseño de parámetros de registros sismográficos”**. Caracas. Tomo I. 215 p

Parasnis, D. (1962). **“Principios de geofísica aplicada”**. Parainfo. Madrid. 208 p.

- Parnaud, F.(1995). **“Stratigraphy of western Venezuela”**. AAPG Memoir, Caracas.
- Planchart C. y otros. (2002). **“Walkaway VSP y offset en Lagomar, Venezuela”**. S.O.V.G XI Congreso Venezolano de Geofísica.
- Roure., F. y otros. (1997). **“Within-plate deformations in the Maracaibo and east Zulia Basins, western Venezuela”**. Marine and Petroleum Geology, 14 (2). 139- 163.
- Salazar M. y otros. (2000) **“Proyecto exploratorio PGP Lago central Lago de Maracaibo”**. Documento técnico. PDVSA.
- Schlumberger (1984). **“Evaluación de formaciones- México. Schlumberger offshore”**. México V-1 – V-43.
- Sheriff, Robert E. (2002). **“Encyclopedic dictionary of exploration geophysics”**. Fourth edition. Tulsa, Okla: Society of Exploration Geophysicists. 376 p.
- Sonneland, L. (1989). **“Application of seismic wavefield attributes in reservoir characterization”**. Expanded abstracts, SEG, Dallas, 1989, Vol. II: 813-817.
- Taner, M. T., Koehler, F. y Sheriff R. (1979). **“Complex seismic trace analysis”**. Geophysics. 44 (6): 1041-1063.
- Taner, M. T. (2001). **“Seismic attributes”**. [Artículo en línea]. Disponible: [http://www.cseg.ca/recorder/pdf/2001/09Sep/06\\_Sep2001.pdf](http://www.cseg.ca/recorder/pdf/2001/09Sep/06_Sep2001.pdf) [Consulta: 2005, 25 de noviembre]